



Tiago Alexandre Rodrigues Madeira

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com resíduos cerâmicos

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Santana

Arguente: Professora Doutora Isabel Torres

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2013



Tiago Alexandre Rodrigues Madeira

Licenciado em Engenharia Civil

Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com resíduos cerâmicos

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Santana

Arguente: Professora Doutora Isabel Torres

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2013

Argamassas de cal hidráulica natural com adição de resíduos cerâmicos

‘Copyright’ Tiago Alexandre Rodrigues Madeira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Some are born great,
some achieve greatness,
and some have greatness thrust upon them*

William Shakespeare

Ao meu pai, um homem singular

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todos os que me ajudaram direta ou indiretamente na realização desta dissertação:

À professora Doutora Paulina Faria, orientadora da presente dissertação, pela disponibilidade e apoio que prestou, pelo tempo despendido na transmissão de conhecimentos e pelo rigor exigido durante todo o trabalho. Agradeço o estímulo que transmitiu durante a elaboração desta dissertação, sem esquecer a ajuda na revisão final do texto.

Ao Vítor Silva, bolseiro da FCT-UNL, pelo acompanhamento e colaboração na fase experimental, na realização dos ensaios e pelas opiniões na análise e tratamento de resultados obtidos.

Aos meus colegas Duarte Vargas e João Valério, que me acompanharam desde o início da dissertação, pela amizade, companheirismo e compreensão que sempre demonstraram, nos melhores e piores momentos. E cuja amizade irá perdurar.

Á Inês, pela motivação e apoio que demonstrou durante todo percurso académico, que culminou nesta dissertação, sem ela certamente teria sido mais difícil.

Aos meus amigos e colegas, Cátia Abreu, Diogo Resende, Lara Neves, João Nabais, Márcio, Maurício e Nuno Mamede que me acompanharam durante todo o percurso académico, e pelos quais tenho especial amizade.

Por fim, e mais importante, aos meus pais, Ana e António, pelo amor, dedicação e princípios sobre os quais me educaram, a eles lhes devo o que sou, é deles parte da minha conquista.

RESUMO

Durante as últimas décadas, em Portugal verificou-se um crescente aumento da construção, a nível habitacional e a nível de infraestruturas. Percebe-se agora que este volume foi excessivo para as necessidades do país, o que levou ao abrupto declínio do sector da construção civil nos últimos anos.

Atualmente a necessidade de adaptar a construção às necessidades reais do mercado leva, cada vez mais, a uma maior preocupação com a reabilitação e conservação dos edifícios existentes, dando especial atenção à ecoeficiência da construção e dos materiais utilizados.

No presente estudo são caracterizadas argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com adições de resíduos cerâmicos provenientes de materiais de construção. Estas adições são definidas em relação à massa de ligante (10% e 25%). Desta forma foram produzidas e caracterizadas, aos 28, 90 e 180 dias cinco argamassas diferentes de traço volumétrico 1:4 de cal e areia (uma argamassa de referência e quatro onde variam as percentagens e tipo de resíduo cerâmico adicionado), que foram expostas a três curas distintas: cura standard (ST), cura com aspersão inicial (SP) e cura em exposição natural marítima (M). Para além da caracterização laboratorial foi ainda observado o comportamento a curto prazo das argamassas com resíduos em rebocos aplicados sobre muretes experimentais, em condições de exposição natural.

A adição de resíduos cerâmicos apresentou melhorias às resistências mecânicas das argamassas, assim como no seu comportamento face à presença de água e ataque de sulfatos, no entanto verificou-se um efeito nocivo da exposição ao ambiente marítimo por parte das argamassas, uma vez que essa cura influenciou negativamente os parâmetros estudados.

Com base no estudo efetuado verificou-se que as argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com adições cerâmicas cumprem os requisitos para a sua aplicação em edifícios antigos e em alvenaria moderna.

Termos chave: Argamassa; Cal hidráulica natural; Resíduo cerâmico; Condições de cura; Conservação; Reabilitação

ABSTRACT

During the last decades, in Portugal, there was a growing increase in construction, whether both in terms of housing and infrastructure; nowadays it is realized that this volume was excessive and led to the abrupt decline of the construction sector in recent years.

The need to adapt to the real needs of the construction market leads, increasingly, to a greater concern for the conservation, rehabilitation and maintenance of existing buildings, with special attention to eco-efficiency of construction and materials used.

In this study natural hydraulic lime NHL3.5 mortars with additions of two ceramic wastes from building materials are characterized. The residues are a percentage of the mass of lime. Thus, five different mortars with a volumetric proportion 1:4 (lime:sand) were produced and characterized at 28, 90 and 180 days - a reference mortar and four different compositions in which varies the percentages of ceramic residue (10% and 25%). The mortars were exposed to three different cures: standard curing (ST), cure with initial water spray (SP) and natural exposure marine curing (M). After a laboratory characterization, the behavior at short term of renders made with mortars with ceramic residues at natural exterior exposure were also observed.

The addition of ceramic waste presented improvements to the mechanical strength of mortars, as well as their behavior in face to the presence of water and sulfate attack; nevertheless, there was also a detrimental effect on the mortars by exposure to the marine environment, once that curing negatively influenced the studied parameters.

Based on the study conducted it was found that the natural hydraulic lime mortars with ceramic residues additions have the necessary requirements for its application on old buildings, as well as on modern masonry.

Keywords: Mortar; natural hydraulic lime; ceramic residue; Cure conditions; Conservation; Rehabilitation.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	ENQUADRAMENTO	1
1.2.	OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2.	ESTADO DOS CONHECIMENTOS.....	5
2.1.	EFICIÊNCIA AMBIENTAL	5
2.2.	REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS.....	7
2.3.	CAL HIDRÁULICA NATURAL.....	10
2.4.	RESÍDUOS CERÂMICOS	11
2.5.	AREIAS.....	12
2.6.	ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL COM RESÍDUOS CERÂMICOS	13
3.	CAMPANHA EXPERIMENTAL	15
3.1.	INTRODUÇÃO À CAMPANHA EXPERIMENTAL	15
3.2.	CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS.....	15
3.2.1.	<i>Cal hidráulica natural</i>	15
3.2.2.	<i>Areias</i>	16
3.2.3.	<i>Resíduo de tijolo furado (T1) e resíduo de ladrilhos de revestimento (T2)</i>	16
3.2.4.	<i>Água</i>	18
3.3.	PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS	18
3.3.1.	<i>Amassaduras</i>	19
3.3.2.	<i>Provetes prismáticos</i>	19
3.3.3.	<i>Provetes de argamassa sobre tijolo</i>	20
3.4.	EXECUÇÃO DE REBOCO SOBRE MURETE DE TIJOLO	21
3.5.	CONDIÇÕES DE CURA.....	21
3.5.1.	<i>Cura Standard (ST)</i>	22
3.5.2.	<i>Cura de Aspersão Inicial (Sp)</i>	22
3.5.3.	<i>Cura Marítima (M)</i>	23
3.5.4.	<i>Cura de exposição natural na FCT UNL</i>	23
4.	ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	25
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	26
4.1.1.	<i>Análise granulométrica dos agregados</i>	26
4.1.2.	<i>Baridade</i>	28

4.1.3.	<i>Consistência por Espalhamento e Relação água/ ligante</i>	29
4.1.4.	<i>Retenção de Água</i>	31
4.1.5.	<i>Massa Volúmica da argamassa fresca</i>	33
4.1.6.	<i>Teor em Ar</i>	35
4.2.	ESTADO ENDURECIDO – PROVETES PRISMÁTICOS	36
4.2.1.	<i>Módulo de Elasticidade Dinâmico</i>	36
4.2.2.	<i>Ensaio de resistência à tração por flexão</i>	40
4.2.3.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão</i>	44
4.2.4.	<i>Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade</i>	48
4.2.5.	<i>Ensaio de Secagem</i>	53
4.2.6.	<i>Ensaio de porosidade aberta</i>	60
4.2.7.	<i>Ensaio de resistência à ação dos sulfatos</i>	66
4.3.	PROVETES EM TIJOLOS	71
4.3.1.	<i>Ensaio de condutibilidade térmica</i>	72
4.3.2.	<i>Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons</i>	73
4.3.3.	<i>Ensaio de absorção de água a baixa pressão (tubos de Karsten)</i>	75
4.4.	ESTAÇÃO DE ENVELHECIMENTO NATURAL DE REBOCOS	79
5.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	86
5.1.	CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	90
5.2.	PARÂMETROS MECÂNICOS DAS ARGAMASSAS.....	91
5.3.	COMPORTAMENTO FACE À ÁGUA	94
5.4.	COMPORTAMENTO FACE À AÇÃO DOS SULFATOS	99
5.5.	UTILIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM EDIFÍCIOS ANTIGOS.....	100
5.6.	APLICAÇÃO DE REBOCOS EM ALVENARIAS	102
5.7.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE TRABALHOS SEMELHANTES.	103
6.	CONCLUSÕES	110
6.1.	CONCLUSÕES FINAIS.....	110
6.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	112
	BIBLIOGRAFIA	115
	ANEXOS	121
	ANEXO I – FICHA TÉCNICA DA CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL 3,5, DA SECIL	122
	ANEXO II - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - edifícios muito degradados ou com necessidade de reparações	7
Figura 3.1 - Areias utilizadas	16
Figura 3.2 - Pó de tijolo (T1) e ladrilho T2.....	17
Figura 3.3 - sequência da amassadura	19
Figura 3.4 - Preparação dos Moldes para os Provetes prismáticos	20
Figura 3.5 - Compactação das amassaduras no molde	20
Figura 3.6 – Preparação de tijolo para aplicação das argamassas	21
Figura 3.7 - Proвете de Argamassa Sobre Tijolo	21
Figura 3.8 - Cura Standard.....	22
Figura 3.9 - Cura de aspersão.....	22
Figura 3.10 - Provetes em exposição marítima	23
Figura 3.11 – Estação de Exposição natural de Revestimentos	23
Figura 4.1 - Organização experimental dos provetes prismáticos.....	
Figura 4.2- Curvas granulométricas da mistura das areias	26
Figura 4.3 - Granulometria por difração laser ao resíduo T1	27
Figura 4.4 – Granulometria por difração laser ao resíduo T2	28
Figura 4.5 - Determinação da baridade.....	28
Figura 4.6 – Ensaio de consistência por espalhamento	30
Figura 4.7- Consistência por espalhamento	31
Figura 4.8 - Preparação do molde para ensaio de retenção de água.	32
Figura 4.9 - Pesagem do papel de filtro	32
Figura 4.10 - Retenção de água.....	33
Figura 4.11 - Recipiente com argamassa em estado fresco	34
Figura 4.12 - Massa volúmica.....	34
Figura 4.13 - Ensaio de determinação do teor em ar	35
Figura 4.14 - Teor em ar.....	36
Figura 4.15 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	37
Figura 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	38
Figura 4.17 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias	38
Figura 4.18 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias	39
Figura 4.19 – Evolução do módulo de elasticidade dinâmico.....	40
Figura 4.20 - Ensaio de resistência à tração por flexão	41
Figura 4.21 - Resistências à tração por flexão aos 28 dias	42
Figura 4.22 - Resistência à tração por flexão aos 90 dias	42

Figura 4.23 - Resistência à tração por flexão aos 180 dias.....	43
Figura 4.24 - Resistência à tração por flexão	44
Figura 4.25 - Ensaio de resistência à compressão.....	45
Figura 4.26 - Resistência à compressão aos 28 dias	45
Figura 4.27 - Resistência à compressão aos 90 dias	46
Figura 4.28 - Resistência à compressão aos 180 dias	46
Figura 4.29 – Evolução resistência à compressão	47
Figura 4.30 - Ensaio de capilaridade.....	48
Figura 4.31 - Curvas de capilaridade aos 28 dias	50
Figura 4.32 - Curvas de capilaridade aos 90 dias	50
Figura 4.33 - Curvas de capilaridade aos 180 dias	51
Figura 4.34 - Evolução do coeficiente de capilaridade	52
Figura 4.35 - Evolução do valor assintótico	52
Figura 4.36 - Ensaio de secagem	53
Figura 4.37 - Curva de secagem aos 28 dias	55
Figura 4.38 - Taxa de secagem aos 28 dias	55
Figura 4.39 - Índice de secagem aos 28 dias	55
Figura 4.40 - Curvas de secagem aos 90 dias.....	56
Figura 4.41 - Taxa de secagem aos 90 dias	56
Figura 4.42- Índice de secagem aos 90 dias	57
Figura 4.43 - Curvas de secagem aos 180 dias.....	57
Figura 4.44 - Taxas de secagem aos 180 dias.....	58
Figura 4.45 - Índice de secagem aos 180 dias	58
Figura 4.46 - Evolução da taxa de secagem	59
Figura 4.47 – Evolução do índice de secagem	59
Figura 4.48 - Ensaio de porosidade aberta	60
Figura 4.49 - Porosidade aberta aos 28 dias	62
Figura 4.50 - Massa volúmica aos 28 dias	62
Figura 4.51 - Porosidade aberta aos 90 dias	63
Figura 4.52 - Massa volúmica aos 90 dias	63
Figura 4.53 - Porosidade aberta aos 180 dias	64
Figura 4.54 - Massa volúmica aos 180 dias	64
Figura 4.55 - Evolução da porosidade aberta	65
Figura 4.56 - Evolução da massa volúmica.....	65
Figura 4.57 - Ensaio de resistência aos sulfatos	67
Figura 4.58- Resistência aos sulfatos aos 28 dias	68
Figura 4.59 - Resistência aos Sulfatos aos 90 dias	69

Figura 4.60 - Retenção inicial de sulfatos aos 90 dias.....	69
Figura 4.61 - Resistência aos Sulfatos aos 180 dias	70
Figura 4.62 - Retenção inicial de sulfatos aos 180 dias.....	70
Figura 4.63 - Evolução da resistência aos sulfatos.....	71
Figura 4.64 - Ensaio de condutibilidade térmica.....	72
Figura 4.65 - Resultados da condutibilidade Térmica	73
Figura 4.66 - Preparação e realização do ensaio de ultrassons	74
Figura 4.67 - Velocidade de Propagação dos Ultrassons.....	75
Figura 4.68 - Ensaio de absorção de água (tubos de Karsten)	75
Figura 4.69 - Curvas de absorção de água a baixa pressão, 28 dias	77
Figura 4.70 - Curvas de absorção de água a baixa pressão, 90 dias	77
Figura 4.71 - Curvas de absorção de água a baixa pressão, 180 dias	78
Figura 4.72 - Evolução da quantidade de água absorvida aos 60 minutos	79
Figura 4.73 - Evolução do coeficiente de absorção aos 60 minutos.....	79
Figura 4.74 - Alinhamento das cofragens de sapatas	80
Figura 4.75 - Colocação de Betão em sapatas.....	81
Figura 4.76 - Produção de argamassa e assentamento de alvenaria	81
Figura 4.77 - Parque de muretes.....	82
Figura 4.78 - Organização dos muretes	82
Figura 4.79 - Organização de argamassas no murete.	83
Figura 4.80 - Preparação de argamassa para aplicação	83
Figura 4.81 - Aplicação do chapisco	84
Figura 4.82 - Aplicação de reboco sobre a camada de chapisco	84
Figura 4.83 - Aspeto final do murete rebocado.....	84
Figura 5.1 - Espalhamento e Massa volúmica.....	90
Figura 5.2 - Espalhamento e relação água/ligante.....	90
Figura 5.3 - Teor em ar e retenção de água.....	91
Figura 5.4 - Parâmetros mecânicos aos 28 dias	92
Figura 5.5 - Parâmetros mecânicos aos 90 dias	92
Figura 5.6 - Parâmetros mecânicos aos 180 dias.....	92
Figura 5.7 - Comparação entre Edin e ultrassons, 28 dias	93
Figura 5.8 - Comparação entre Edin e ultrassons, 90 dias	93
Figura 5.9 - Comparação entre Edin e Ultrassons, 180 dias	94
Figura 5.10 - Valor assintótico, índice de secagem e Pab aos 28 dias.....	95
Figura 5.11 - Valore assintótico, índice de secagem e Pab aos 90 dias.....	95
Figura 5.12 - Valor assintótico, índice de secagem e Pab aos 180 dias.....	95
Figura 5.13 - Evolução do parâmetro AB.....	97

Figura 5.14 - Comportamento à água diferença entre suporte, 28 dias	98
Figura 5.15 - Comportamento à água, diferença entre suporte, 90 dias	98
Figura 5.16 - Comportamento à água, diferença entre suportes, 180 dias	98
Figura 5.17 - Resistência aos sulfatos, 28 dias	99
Figura 5.18 - Resistência aos sulfatos, 90 dias	100
Figura 5.19 - Resistência aos sulfatos, 180 dias	100
Figura 5.20 - Comparação dos parâmetros mecânicos, entre traços.	104
Figura 5.21 – Comparação de comportamento á água, entre traços.	105
Figura 5.22 - Comparação de parâmetros mecânicos aos 28 dias.....	106
Figura 5.23 - Comparação do comportamento face à água aos 28 dias	107

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Gama de valores, para aplicação em edifícios antigos	9
Quadro 2.2 - Classificação das propriedades das argamassas endurecidas.....	10
Quadro 3.1 - Composição química (em % de massa) da NHL3.5.....	16
Quadro 3.2 - Reatividade pozolânica do resíduo cerâmico T2	17
Quadro 3.3 - Composição das Argamassas.....	18
Quadro 4.1 - Baridade dos Constituintes	29
Quadro 4.2 - Traço volumétrico e ponderal	30
Quadro 5.1 - Síntese dos resultados – Argamassas no estado fresco	86
Quadro 5.2 - Síntese dos resultados de caracterização mecânica.....	86
Quadro 5.3 - Síntese dos resultados de caracterização face à água	87
Quadro 5.4 - Síntese dos resultados de resistência aos sulfatos	88
Quadro 5.5 - Síntese de resultados – Provetes de argamassa sobre tijolos	89
Quadro 5.6 - Verificação de requisitos na aplicação de rebocos,.....	101
Quadro 5.7 - Verificação de requisitos no refechamento de juntas.	102
Quadro 5.8 - Classificação das argamassas segundo NP EN 998-1	103
Quadro 5.9 - Comparação de traços ponderais.	106
Quadro 6.1 - Espalhamento em estado fresco	123
Quadro 6.2 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	123
Quadro 6.3 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias	126
Quadro 6.4 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias	129
Quadro 6.5 - Resistência à tração e compressão aos 28 dias	132
Quadro 6.6 - Resistência à tração e compressão aos 90 dias	133
Quadro 6.7 - Resistência à tração e compressão aos 180 dias	134
Quadro 6.8 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 28 dias	135
Quadro 6.9 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 90 dias	136
Quadro 6.10 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 90 dias	137
Quadro 6.11 - Capilaridade aos 28 dias cura standard	138
Quadro 6.12 - Capilaridade aos 28 dias cura marítima.....	138
Quadro 6.13 - Capilaridade aos 90 dias cura standard	139
Quadro 6.14 - Capilaridade aos 90 dias cura marítima.....	139
Quadro 6.15 - Capilaridade aos 180 dias cura standard.....	140
Quadro 6.16 - Capilaridade 180 dias cura marítima.....	140
Quadro 6.17 - Variação de massa por sulfatos aos 28 dias cura standard	141
Quadro 6.18 - Variação de massa por sulfatos aos 28 dias cura marítima.....	141

Quadro 6.19 - Variação de massa por sulfatos aos 90 dias cura standard	142
Quadro 6.20 - Variação de massa por sulfatos aos 90 dias cura marítima	142
Quadro 6.21 - Variação de massa por sulfatos aos 180 dias cura standard	143
Quadro 6.22 - Variação de massa por sulfatos aos 180 dias cura marítima ...	143

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Materiais

APAS 12 – Areia de granulometria grossa.

APAS 20 – Areia de granulometria intermédia.

APAS 30 – Areia de granulometria fina.

T1- Resíduo cerâmico T1

T2- Resíduo cerâmico T2

NHL – Cal hidráulica natural 3.5.

Curas

SP – Cura de aspersão, em ambiente controlado de humidade relativa 65% e temperatura 20°C.

M – Cura marítima, em ambiente natural junto ao mar (Cabo Raso).

ST – Cura de referência, em ambiente controlado de humidade relativa 65% e temperatura 20°C.

Ensaio e parâmetros

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

CS – Coeficiente de secagem

Esp – Consistência por espalhamento

Dp – Desvio padrão

Hr – Humidade relativa

IS – Índice de secagem

MV_{ap} – Massa volúmica aparente

E_{din} – Módulo de elasticidade dinâmico

P_{ab} – Porosidade aberta

R_c – Resistência à compressão

R_t – Resistência à tração por flexão

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Atualmente regista-se, em Portugal, um decréscimo na construção de novos edifícios. No entanto, constata-se a necessidade de preservar o edificado existente, que em muitos casos carece de manutenção e encontra-se em situações de avançado estado de deterioração. Desta forma, tem-se verificado uma maior atenção pela reabilitação e conservação do património existente.

Em muitos dos edifícios reconhecem-se problemas ao nível dos rebocos exteriores, que são, em muitos casos, desvalorizados quanto à sua importância.

A compreensão do comportamento e características das argamassas de revestimento torna-se bastante importante quando consideradas intervenções de substituição ou reabilitação, sobretudo no caso de edifícios antigos, cujos materiais e características construtivas, não se coadunam com as soluções modernas existentes no mercado.

Os rebocos são os constituintes mais vulneráveis dos edifícios. A sua exposição aos agentes externos, como o clima, poluição e impacto de ações, torna-os particularmente suscetíveis à degradação. A falta de manutenção e conhecimento insuficiente sobre as técnicas de conservação pode produzir deterioração grave, decidindo-se muitas vezes pela substituição. (Veiga et al., 2010).

Deste modo a aplicação e manutenção dos rebocos exteriores exige uma atenção especial, tal como a escolha das matérias a aplicar, deve ser tida em conformidade com os constituintes do suporte. O desenvolvimento de novas argamassas, duráveis e compatíveis com as paredes e materiais pré-existentes, torna-se essencial para a manutenção da imagem e integridade dos edifícios (Veiga et al., 2009).

Atualmente o cimento Portland continua a dominar o panorama das argamassas como ligante, mas existem outros ligantes que podem ser utilizados em construções de menor exigência estrutural. Tanto a cal aérea com aditivos pozolânicos, como a cal hidráulica têm sido utilizadas ao longo dos tempos com sucesso, demonstrando um desempenho adequado e em alguns casos uma grande durabilidade (Velosa e Cachim, 2008).

A introdução de resíduos cerâmicos em argamassas de cal não é uma solução inovadora. Existem evidências da sua utilização por povos antigos como os Romanos e os Gregos, a fim de garantirem hidraulicidade às suas argamassas, que sobreviveram até aos dias de hoje em excelentes condições (Böke et al., 2006; Monterio e Faria, 2006). Outro aspeto importante na utilização deste tipo de resíduos em argamassas é a sua importância ao nível ambiental. Com efeito, o reaproveitamento destas matérias responde a uma preocupação mundial cres-

cente ao nível da reutilização e gestão de desperdícios provenientes do sector da construção civil (Torgal et al., 2012).

Esta dissertação de mestrado surge no seguimento de outros trabalhos já realizados, sobre a caracterização das argamassas produzidas com uma cal hidráulica natural de formulação e comercialização recente em Portugal (Grilo, 2013; Grilo et al., 2013^a; Grilo et al., 2013b), com eventual adição de um metacaulino, sobre a caracterização de argamassas com introdução de resíduo de cerâmica em argamassas de cal aérea (Faria, 2004; Faria e Henriques, 2004; Matias et al., 2013; Fontes et al., 2012; Fontes, 2013). Desenvolveu-se no âmbito do projeto financiado pela FCT EXL/ECMCOM/0928/2012.

Com este estudo pretende-se dar continuidade a estudos já realizados sobre a incorporação de resíduos nas argamassas de revestimento, na expectativa de valorizar a reutilização de resíduos na área da construção.

Para tal foi executada uma caracterização mecânica e física de argamassas de cal hidráulica natural (NHL3.5), produzida segundo a nova norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011), adicionadas com dois resíduos provenientes da indústria cerâmica.

1.2. Objetivos e metodologia

Este trabalho tem o objetivo de avaliar, do ponto de vista do comportamento mecânico e físico, em função de diferentes condições de cura ao longo da idade:

- Argamassas produzidas com uma cal hidráulica natural NHL3.5 de formulação portuguesa e comercialização recente:
- Eventuais melhorias que possam ser obtidas em argamassas dessa cal hidráulica natural NHL3.5 com a adição de duas diferentes percentagens de dois diferentes resíduos cerâmicos.

Os dois resíduos cerâmicos utilizados em granulometria fina, são provenientes de tijolo furado corrente e de ladrilhos cerâmicos de revestimento exterior de paredes; podem resultar de desperdícios de obra ou de material não conforme em fábrica ou na receção. São introduzidos em percentagem de massa de cal hidráulica natural NHL3.5. Com as argamassas, são produzidos provetes prismáticos e provetes constituídos por uma camada de argamassa sobre tijolo furado. Os provetes de argamassa são submetidos a três condições de cura laboratoriais, a 65% de humidade relativa (HR) após cura húmida inicial e a cura a 65% de HR mas com aspersão diária de água durante os primeiros dias, e a uma cura em condições de exposição natural em ambiente marítimo. As argamassas são analisadas aos 28, 90 e 180 dias.

1.3. Organização da dissertação

O texto foi dividido em seis capítulos. No presente capítulo, é feito um enquadramento ao tema e são apresentados os objetivos e motivações que suportam a investigação, sendo também descrita a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se o estado do conhecimento na área; do reaproveitamento de resíduos e a sua importância quando incorporados em argamassas; o estado da reabilitação em Portugal e a importância das argamassas de cal hidráulica nesse contexto. São ainda apresentados resultados referentes a outros trabalhos efetuados nesta área.

No terceiro capítulo descrevem-se os procedimentos seguidos na campanha experimental, são apresentados os materiais e constituintes das argamassas assim como as suas características, as curas a que foram sujeitas as argamassas em estudo.

No quarto capítulo são descritos os ensaios efetuados em estado fresco e endurecido, sendo ainda apresentados respetivos resultados obtidos.

No quinto capítulo é feita a discussão dos resultados obtidos, através da análise de vários parâmetros, característicos das argamassas; são também comparados resultados com trabalhos semelhantes e é feita a avaliação das argamassas segundo critérios definidos para a sua aplicação em rebocos de alvenaria e em edifícios antigos.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões sobre a investigação, sendo também sugeridos desenvolvimentos futuros no âmbito deste trabalho.

2. ESTADO DOS CONHECIMENTOS

2.1. Eficiência Ambiental

Atualmente existe uma crescente preocupação com a utilização dos recursos naturais e uma procura na sua utilização sustentável. Reduzir o impacto ambiental proveniente da indústria da construção civil é cada vez mais uma necessidade.

Os materiais que constituem um edifício têm uma contribuição significativa no impacto sobre o meio ambiente. Este impacto é sentido de várias maneiras; localmente, através do efeito de atividades, tais como a extração mineira; globalmente, com o aumento de dióxido de carbono libertado para a atmosfera, devido ao tipo e quantidade de energia utilizada para o fabrico dos materiais e, internamente, nos efeitos sobre a saúde do ocupantes do edifício (Harris, 1999).

As construções de hoje estão sob constante pressão para se tornarem cada vez mais "ambientalmente amigáveis", existe uma grande procura de novos métodos para a incorporação de materiais reciclados na produção construtiva atual (Maier e Durham, 2012).

O princípio que reside por de trás da expressão "construção sustentável" é minimizar custos de energia na construção e manutenção dos edifícios. Durante o seu período de vida, um edifício irá consumir entre 20% e 50% dos recursos físicos no seu meio circundante (Gálvez, 2013). O consumo de energia é quantificado pela energia utilizada para a construção do edifício e a manutenção necessária durante a sua vida útil (Thormark, 2006).

A energia incorporada em edifícios pode assim ser classificada em dois tipos: a energia para a manutenção/reparação de um edifício durante a sua vida útil, e a quantidade de energia que entra na construção de um edifício (energia incorporada), utilizando os vários materiais necessários. A energia incorporada nos edifícios pode variar bastante, dependendo da escolha dos materiais de construção e das técnicas de construção implementadas (Venkatarama, 2003).

A produção de cimento Portland produz quantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂). Nos Estados Unidos, apesar de avanços recentes na produção de cimento e na redução da quantidade de CO₂ libertado na atmosfera, para menos de 3% do total de emissões dos Estados Unidos, a produção industrial de cimento em 2009 produziu uma estimativa de 29 milhões de toneladas métricas de CO₂. Também em Portugal as cimenteiras têm efetuado esforços profícuos nesse sentido. Mas o uso de materiais reciclados para substituir parcialmente o cimento (ou o seu clínquer) é cada vez mais uma prática comum. Tem-se vindo a demonstrar que a utilização de certos materiais reciclados aumenta a resistência, durabilidade e trabalhabilidade do betão (Maier e Durham, 2012).

O betão é há décadas o material de construção mais utilizado no mundo; a produção mundial de betão atingiu mais de uma tonelada per capita no planeta. Sabe-se que cada m³ de betão contém cerca de 1 m³ de agregados.

A tendência crescente do consumo de agregados, levanta preocupações ao nível da gestão destes recursos naturais e propõe novas opções para a sua obtenção. A reciclagem de resíduos de betão, e a produção de agregados a partir desses resíduos, apresenta uma solução sustentável para os problemas do esgotamento das jazidas de agregados naturais e do espaço para aterro (Radonjanin et al., 2013).

Na União Europeia, os resíduos de construção e demolição representam pelo menos 180 milhões de toneladas por ano. Cerca de 75% destes resíduos são depositados em aterros, apesar do seu elevado potencial para reciclagem. No entanto, a viabilidade técnica e económica da reciclagem tem sido comprovada, permitindo assim a alguns Estados membros (em particular a Dinamarca, Holanda e Bélgica) alcançar taxas de reciclagem de mais de 80%, enquanto nos países do sul da Europa registam-se taxas de aproveitamento muito baixas na ordem dos 20% (Corinaldesi, 2012).” *Relativamente a Portugal, muito recentemente o Instituto Superior técnico (universidade técnica de lisboa) estimou em 4,4 Mt os resíduos de RCd¹ produzidos durante 2004, os quais podiam ser reaproveitados e dos quais 95% tiveram como destino a deposição em aterro*” (Torgal & Jalali, 2008)

A introdução de resíduos reciclados na construção parece ser uma resposta fiável para o problema da sustentabilidade dos recursos naturais, e diminuição dos efeitos nocivos para o ambiente gerados pela indústria da construção. Scheuer (Scheuer et al., 2003) tal como outros autores, têm estudado os efeitos da substituição de certos materiais por materiais energeticamente sustentáveis na construção civil. A introdução de materiais reciclados na construção leva à diminuição da energia consumida durante o processo construtivo, elevando deste modo o grau de sustentabilidade dos edifícios.

A utilização de resíduos reciclados aliado a materiais com menores quantidades de energia incorporada, leva a um menor impacto ambiental, nomeadamente na redução das emissões de CO₂. Quando se transportam estes factos para as argamassas, verifica-se que a utilização de argamassas à base de cal apresenta ao nível da sustentabilidade, uma solução vantajosa face às muito usadas argamassas de cimento. Em estudos efetuados verificou-se que as argamassas de cal apresentaram consumos de energia menores quando comparadas a argamassas à base de cimento (Venkatarama, 2003). Introduzindo resíduos nessas argamassas de cal os benefícios serão ainda maiores. Apesar das argamassas poderem corresponder a uma pequena parte de um edifício, quando aplicadas em revestimento são aquelas que se encontram sujeitas a um maior desgaste natural, necessitando de uma manutenção acrescida em

¹ Resíduos de construção e demolição (RCD)

relação aos restantes elementos construtivos, criando deste modo um efeito de escala significativo em termos da energia incorporada nestes elementos.

2.2. Reabilitação de Edifícios

Enquadramento

A reabilitação tem vindo a ganhar notoriedade nos últimos anos. O declínio da construção nova terá de levar a uma viragem do setor da construção civil em Portugal, focalizando-o mais para a reabilitação do património edificado existente.

Em Portugal, existem em média 1,45 habitações por cada agregado familiar, o segmento da construção nova apresenta menor potencialidade de mercado nos próximos anos, pelo que importa analisar a capacidade do parque edificado nacional para acolher o desenvolvimento do segmento da reabilitação (INE, 2013).

Em 2011 subsistiam no parque habitacional português cerca de 1 milhão de edifícios que necessitavam de intervenção. De entre este universo, cerca de 160 000 edifícios tinham necessidade de grandes reparações ou estavam muito degradados (Figura 2.1), constituindo deste modo um objeto importante para as intervenções de reabilitação (INE, 2013).

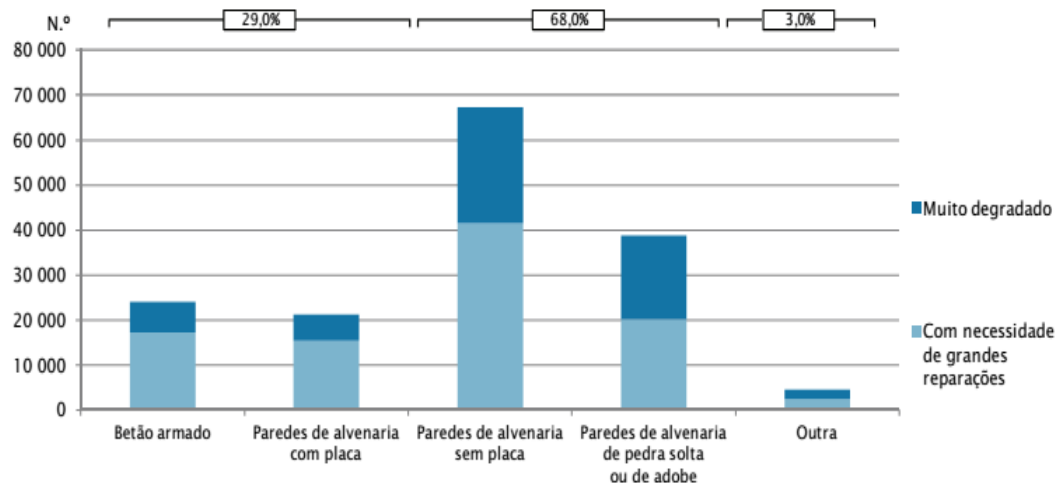


Figura 2.1 - Número de edifícios muito degradados ou com necessidade de reparações (INE, 2013)

Uma quantidade expressiva dos edifícios portugueses existentes são prédios antigos, que, muitas vezes revelam uma certa falta de manutenção ou conservação, e consequentemente levam ao aparecimento de várias patologias. A causa desta patologia prematura deve-se a construção e concepção inadequada ou deficiente escolha de materiais de

construção, entre outros, e pode resultar em colapso parcial ou total dessas construções (Murta et al., 2011).

Estes dados evidenciam a situação de carência de um grande número de edifícios em Portugal, o que por si só, revela o grande potencial e o trabalho que ainda existe na área da reabilitação em Portugal.

Argamassas

No plano da reabilitação e conservação de edifícios as argamassas detêm uma importância acrescida; nomeadamente as argamassas de revestimento ou substituição, estas representam a primeira linha de defesa do edifício face ao meio exterior.

Com o passar do tempo a permanente exposição dos revestimentos dos edifícios às agressões atmosféricas obriga a um desgaste e deterioração contínuos por parte destes elementos. Isto acarreta consequências estéticas que podem comprometer a durabilidade do edifício, uma vez que a degradação dos materiais pode levar à entrada de humidade diminuindo as condições de habitabilidade interior.

A primeira opção a considerar numa intervenção sobre os revestimentos existentes num edifício antigo, deve ser a de os conservar, recorrendo se necessário a reparações pontuais. No caso de se verificar a necessidade de se substituir parcialmente ou na totalidade, as argamassas de substituição devem ser escolhidas tendo em conta a sua finalidade, sendo necessário verificar vários requisitos funcionais e estéticos (Veiga, 2003).

De um modo geral para que o revestimento possa cumprir as exigências requeridas, necessita deter resistência mecânica suficiente, ser relativamente deformável, apresentar impermeabilidade suficiente e ter um bom comportamento aos sais (Couto e Couto, 2007).

Em muitas ações de reabilitação em edifícios antigos verifica-se a aplicação de argamassas à base de cimento na substituição ou reparação de rebocos; este tipo de solução leva muitas vezes a graves problemas, sobretudo quando aplicadas em paredes antigas, uma vez que as argamassas de cimento são de modo geral demasiado rígidas, e muito impermeáveis à água, o que conduz a uma degradação acelerada dos suportes.

A falta de deformabilidade destas argamassas torna-as muitas vezes incompatíveis com suportes antigos, tendencialmente mais deformáveis, o que subsequentemente leva a uma maior fendilhação e fissuração deste tipo de rebocos, permitindo desta forma a entrada de água na forma líquida. Por outro lado o facto de serem muito impermeáveis impossibilita a evaporação da água que possa entrar através das fendas ou fissuras existentes, levando à acumulação excessiva de água entre o suporte e o reboco, podendo causar sérios estragos à própria parede (Mosquera et al., 2006; Grilo et al., 2013a).

As argamassas presentes em edifícios antigos são normalmente argamassas à base de cal; deste modo rebocos à base de cal são altamente recomendáveis em edifícios antigos, já

que geralmente são compatíveis em composição e propriedades físicas com os materiais constituintes dessas alvenarias. As argamassas de cal permitem a passagem de humidade e vapor de água, oferecendo deste modo uma secagem mais eficaz do suporte. Em termos físicos apresentam características que as tornam bastante versáteis, podendo ser aplicadas em várias situações. Dada a sua plasticidade e boa trabalhabilidade, apresentam normalmente uma boa adesão ao suporte, o que, aliado a valores razoavelmente elevados de permeabilidade e porosidade, tornam-nas em opções viáveis para a aplicação em suportes antigos e novos (Hanley e Pavía, 2008).

Em geral, as argamassas de cal são recomendadas por razões de compatibilidade, mas é possível criar uma grande diversidade de misturas, adequando-as a condições e situações diferentes. Para selecionar os materiais apropriados, torna-se necessário conhecer as suas características com antecedência, sendo sempre preferível efetuar uma verificação caso a caso, tendo em conta as condições existentes no local (Veiga et al., 2010).

Considerando o desempenho exigido às argamassas, (Veiga et al., 2010) definiu uma série de valores característicos para argamassas de substituição e refechamento de juntas para aplicação em edifícios antigos (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Gama de valores característicos, aos 90 dias de argamassas para aplicação em edifícios antigos (Veiga et al., 2010).

Tipo de argamassa	Características mecânicas aos 90 dias			Comportamento à água
	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Edin[MPa]	CC [kg/(m ² .m0,5)]
Reboco exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	<1.5;>1.0
Reboco interior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	-
Refechamento de juntas	0,4-0,8	0,6-3,0	3000-6000	<1.5;>1.0

A norma NP EN 998-1 (IPQ, 2010) define um conjunto de valores característicos em estado endurecido para argamassas de reboco, categorizando as argamassas dentro de gamas de valores (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 - Classificação das propriedades das argamassas endurecidas (IPQ, 2010).

Propriedades	Categorias	Valores
Rc aos 28 dias	CSI	0,4-2,5 [MPa]
	CSII	1,5-5,0 [MPa]
	CSIII	3,5-7,5 [MPa]
	CSIV	≥ 6 [MPa]
Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	$CC \leq 0,40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
	W2	$CC \leq 0,20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
Condutibilidade térmica	T1	$\leq 0,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	T2	$\leq 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

2.3. Cal Hidráulica Natural

As argamassas com características hidráulicas têm vindo a ser utilizadas desde o período Greco-Romano; no qual a cal aérea era misturada com pozolanas naturais ou artificiais, com a finalidade de se obter uma argamassa ou betão que endurecem sob a água.

Em 1756 Smeaton descobriu propriedades hidráulicas na queima de produtos calcários contaminados com argila; mais tarde em 1812 Vicat provou que a hidraulicidade destes produtos estava relacionada com a queima simultânea de calcário e argila (Callebau et al., 2001). O nível de hidraulicidade depende, portanto, da quantidade de argila contida nos calcários, da temperatura da cozedura e da duração da cozedura a essa temperatura (Sousa-Coutinho, 1998).

Lanas et al., (2004) e Sabbioni et al., (2001) definem um ligante hidráulico, como um material que contem duas capacidades específicas: a capacidade de endurecer com a adição de água e a propriedade de endurecer quando imerso em água. A cal hidráulica difere da cal área por esta razão, uma vez que a na cal área o endurecimento é feito através da reação com dióxido de carbono.

A produção de cal hidráulica natural, resulta da queima de calcários com teor de argilas entre os 5 e 20% a uma temperatura entre os 800 a 1200°C; neste processo formam-se o óxido de cálcio, os silicatos e os aluminatos, que reagem entre si formando cal hidráulica viva. A cal é então extinta através da aspersão de água, levando a que o óxido cálcio livre se transforme em hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A natureza da cal obtida está diretamente ligada à qualidade mineralógica da rocha calcária utilizada. A cozedura e o tipo de forno utilizado, são também fatores importantes (Faria et al., 2012^a; Ball et al., 2011).

O endurecimento da cal hidráulica natural ocorre em dois períodos diferentes. Inicialmente dá-se a presa hidráulica, através da hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio

no momento da amassadura. A longo prazo o endurecimento acontece por reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera (Sequeira et al., 2007).

Atualmente existe em Portugal uma empresa produtora de cal hidráulica natural, nomeadamente a Secil Martingança, que disponibilizou a cal utilizada neste estudo.

A entrada em vigor da norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011) no seguimento da norma europeia EN 459-1:2010 (CEN, 2010), veio redefinir a classificação das cals de construção de acordo com a sua constituição. Atualmente as cals hidráulicas encontram-se divididas em três ramos: cals hidráulicas naturais (NHL); cals hidráulicas (HL) e cals formuladas (FL).

Para ser classificada como tal, a cal hidráulica natural (NHL) tem de resultar exclusivamente da composição química da matéria-prima natural, não podendo conter quaisquer outros aditivos. De acordo com a nova norma são definidas três classes de acordo com a resistência à compressão obtida aos 28 dias de cura: NHL2; NHL3,5 e NHL5 (IPQ, 2011).

2.4. Resíduos Cerâmicos

Segundo alguns historiadores, resíduos cerâmicos em pó foram usados nos tempos dos fenícios para obter argamassas hidráulicas. Existem marcas evidentes espalhadas pela Europa da utilização destes compostos pelos romanos, na procura de garantir hidraulicidade às suas argamassas. Em Portugal é possível encontrar vestígios deste tipo de argamassas, em zonas arqueológicas como Troia e Conimbriga (Matias et al., 2013; Faria, 2004).

O comportamento hidráulico das argamassas de cal aérea com adições de argila calcinada deve-se sobretudo às reações pozolânicas desenvolvidas por estas. Tais reações são condicionadas pela dimensão das partículas, pela sua superfície específica e pelas quantidades de alumina e sílica em estado amorfo (Faria, 2004). Quando combinadas com o hidróxido de cálcio contido na cal, a sílica e a alumina dos resíduos cerâmicos formam-se aluminatos e silicatos que proporcionam as propriedades hidráulicas observadas nestas argamassas. (Matias et al., 2013).

A temperatura de calcinação da argila tem grande influência nas propriedades hidráulicas; para se obter uma reatividade ótima da argila, a sua calcinação deve ocorrer entre os 600 a 900 °C acima destas temperaturas ocorre cristalização e a reatividade do material diminui (Faria, 2004; O'Farrell et al., 2006).

Na atualidade a cozedura de argilas para o fabrico de tijolos, ladrilhos cerâmicos e telhas, ocorre, segundo indicação dos industriais, a temperaturas superiores a 1000°C, pelo que será de esperar uma diminuição do potencial pozolânico destes materiais. No entanto, não se conhece qual o período de tempo de permanência a esta temperatura, que pode ser muito curto.

Os resíduos cerâmicos influenciam as características das argamassas de dois modos distintos, dependendo da dimensão dos grãos. Em resíduos finos, com partículas de dimensão inferior a 75µm, verifica-se um ganho efetivo de hidraulicidade nas argamassas; com o aumento da dimensão das partículas (acima dos 150µm) a hidraulicidade decresce e é ganha muito lentamente. No entanto, partículas com dimensão superior 300µm, garantem melhorias ao nível da durabilidade, aumentando a porosidade e permitindo a entrada de ar e melhorando os efeitos da carbonatação (Fontes, 2013; Matias et al., 2013).

Verifica-se ainda, a contribuição dos resíduos cerâmicos através do seu papel como filler, contribuindo para a compactação da estrutura porosa da argamassa enquanto fresca, influenciando deste modo as resistências mecânicas no estado endurecido (Faria, 2012b).

2.5. Areias

Os agregados têm forte influência no comportamento das argamassas, já que são o material presente em maior quantidade. Deste modo a variação do tipo de areia, ou mistura de areias, provoca alterações significativas a nível estrutural das argamassas. A sua escolha deve ser rigorosa a fim de garantir as propriedades desejadas (Sousa-Coutinho, 1998).

As areias normalmente utilizadas nas argamassas provêm de jazidas naturais ou de leito de rios, resultantes da erosão natural de rochas, maioritariamente compostas por sílica (areias naturais). Existem no entanto diversos tipos de areia disponíveis no mercado, que são obtidas por britagem de partículas de maior dimensão, geralmente desperdícios de rocha calcária (areias britadas). Por vezes pode ser encontrada alguma argila presente nas areias, incutindo um tom amarelado às areias com maior percentagem deste composto. As areias argilosas conferem geralmente maior trabalhabilidade e resistências mecânicas às argamassas devido à presença elevada de finos provenientes das argilas; por outro lado estas areias necessitam geralmente de uma maior quantidade de água adicionada dada a superfície específica dos finos, o que pode aumentar os fenómenos de retração (Faria e Henriques, 2004; Rato, 2006).

A granulometria das areias, assim como a forma das suas partículas, são aspetos que influenciam a compacidade e porosidade das argamassas. A forma das partículas tem um papel fundamental na adesão entre a pasta de ligante e o agregado, assim como na superfície específica das areias, influenciando a quantidade de água a adicionar durante o processo de amassadura (Rato, 2006).

A granulometria indica-nos a quantidade de grãos de cada dimensão existente no lote de areia ensaiado. A dimensão das partículas de areia encontra-se geralmente entre os 0,063 e os 4mm. Uma areia bem graduada com menor volume de vazios é favorável, já que o aumento do volume de vazios afeta a estrutura porosa das argamassas, exigindo uma quantidade superior de ligante (Margalha et al., 2007)

Existem ainda outros autores que referem mais-valias, nas argamassas com porosidades maiores, visto que, apesar de obterem resistências mecânicas inferiores, a maior dimensão dos poros permite efetuar uma secagem mais eficiente das argamassas (Henriques e Faria, 2008).

2.6. Argamassas de Cal Hidráulica Natural com Resíduos Cerâmicos

Tal como verificado anteriormente, o uso de resíduos cerâmicos em argamassas de cal remonta à antiguidade; com base neste facto vários estudos têm sido efetuados sobre a introdução de resíduos cerâmicos, e a influência destes nas características das argamassas de cal. Embora a maioria se focalizem em argamassas de cal aérea, neste trabalho vai dar-se particular atenção ao seu uso em argamassas de cal hidráulica natural.

Grilo (Grilo, 2013) e Valério (Valério, 2013) caracterizaram argamassas de cal hidráulica natural NHL3,5 partindo de um traço volumétrico 1:3. É importante referir que ambos os trabalhos foram efetuados utilizando materiais idênticos e com duas curas nas mesmas condições da presente dissertação (95% de HR e 65% de HR), apresentando uma situação privilegiada para a comparação de resultados. Grilo concluiu (o trabalho de Valério aguarda ainda discussão pública) que as argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 sob condições de cura standard, apresentam menores resistências mecânicas face às mesmas composições expostas à cura marítima, dada a predominância da reação de carbonatação sobre a reação de hidratação nas argamassas da cura standard.

Faria (Faria et al., 2012a) compararam as características de argamassas com a mesma areia mas com cals aéreas, NHL3.5 e NHL5. Em termos de caracterização mecânica e física concluíram que, aos 28 dias, a exposição a diferentes tipos de cura tem uma influência significativa particularmente nas resistências mecânicas das argamassas de NHL5.

Fontes (Fontes, 2013) caracterizou argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5, partindo de um traço volumétrico 1:3 com a substituição parcial de massa de cal por um resíduo cerâmico proveniente de ladrilhos de revestimento de paredes, (idêntico a um dos utilizados na presente dissertação) nas proporções de 5% e 10 %; a caracterização das argamassas foi feita aos 28, 90 e 180 dias, com três curas diferentes (curas a 95% de HR, a 65% de HR e cura com aspersão inicial de água). Também neste estudo a cal e a areia utilizadas foram idênticas à utilizada na presente dissertação. Concluiu que as argamassas com introdução de resíduo apresentam resultados bastante adequados para o uso em edifícios antigos; as melhorias mais significativas foram registadas nas argamassas sujeitas à cura com aspersão inicial de água.

Matias (Matias et al., 2013) estudaram e caracterizaram a utilização de resíduos cerâmicos provenientes de tijolo, telhas e vasos em argamassas de cal; foram determinadas as características mecânicas, assim com o comportamento face à água, de argamassas de cal

aérea e de cal hidráulica natural NHL3,5 partindo de um traço volumétrico 1:3. Foram efetuadas substituições de 20 e 40% do volume de cais por resíduo cerâmico. Os ensaios de caracterização foram feitos aos 28, 60 e 120 dias. Em termos mecânicos foram obtidos resultados satisfatórios sobretudo nas argamassas de cal hidráulica natural NHL com substituição de 20%. Globalmente concluíram que a introdução de resíduos cerâmicos em argamassas de cais melhora as características destas argamassas.

O estudo efetuado por (Theodoridou et al., 2013) incidiu sobre várias amostras de argamassas proveniente de monumentos da época do bronze na ilha de Chipre. Da análise efetuada pelos autores, concluíram que a todas as argamassas eram compostas por cal hidratada e resíduos cerâmicos finos, que atuavam como ligante. Esta situação também já tinha sido relatada anteriormente por outros autores (Baronio e Binda, 1997); Baronio e Binda concluíram que a longevidade destas argamassas se deve à hidraulicidade dos seus componentes, dando ênfase à capacidade pozzolânica dos resíduos cerâmicos encontrados nessas argamassas. Num estudo recente (Gulotta et al., 2013), estudou-se o comportamento mecânico face à composição de argamassas comerciais de NHL; verificaram que a coloração final obtida pelas argamassas em estado endurecido é maioritariamente da responsabilidade dos agregados nela contidos; deste modo a cor da cal apresenta pouca influência no aspeto final destas argamassas.

Sabbioni (Sabbioni et al., 2001) estudou a degradação atmosférica, sofrida por argamassas de cal hidráulica antigas e recentes. Na conclusão os autores apontam a ação dos sulfatos como o agente principal da degradação dessas argamassas.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução à Campanha Experimental

A campanha experimental tem como objetivo determinar o desempenho de argamassas formuladas com a cal hidráulica natural (NHL3.5) e traço volumétrico 1:4, face a diferentes condições de cura, e caracterizar o seu comportamento quando adicionados resíduos cerâmicos provenientes de dois produtos distintos, pó de tijolo (T1) e pó de ladrilho cerâmico de revestimento de paredes (T2). Com a utilização destes resíduos pretende-se compreender de que modo o efeito filler e/ou pozolânico por eles criado beneficia (ou não) as características gerais das argamassas de cal hidráulica natural (NHL3.5). Caso estas argamassas apresentem resultados compatíveis com aplicações em que genericamente se necessitasse de utilizar traços mais fortes em ligante, poderão permitir reduzir a quantidade de cal utilizada, ao mesmo tempo que reduzem custos com a gestão de desperdícios provenientes dos produtos cerâmicos utilizados.

Deste modo foram formuladas cinco amassaduras, tendo como base o traço volumétrico definido de 1:4, onde a massa de ligante foi mantida e onde foram adicionados 10% ou 25% de resíduos cerâmicos em relação à massa de ligante.

Foram realizados provetes prismáticos e sobre tijolo furado, que foram depois ensaiados nas idades de 28, 90 e 180 dias, estando sujeitos durante estes períodos a três condições de cura. Os resultados desta caracterização são apresentados no capítulo 4.

Neste capítulo 3 serão descritos todos os constituintes das argamassas, tal como a preparação dos provetes e as referentes condições de cura.

As argamassas com as adições de resíduos cerâmicos foram ainda aplicadas em sistemas de reboco sobre muretes de alvenaria de tijolo furado da Estação de Exposição Natural e o seu comportamento foi avaliado visualmente, sendo esta etapa objeto de análise no capítulo 5.

3.2. Constituintes das argamassas

Nesta secção são apresentados as principais matérias-primas utilizadas na composição das argamassas de traço volumétrico 1:4 em estudo. As argamassas são compostas por cal hidráulica natural NHL3.5, três areias granulometricamente distintas, resíduos cerâmicos T1 e T2 e água.

3.2.1. Cal hidráulica natural

A cal hidráulica utilizada nos ensaios, foi produzida pela SECIL Martingança, e classificada segundo a norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011). A cal foi disponibilizada pelo produ-

tor em Outubro de 2012, tratando-se do segundo lote produzido. A composição química da cal de um outro lote anteriormente disponibilizado pelo mesmo produtor é apresentada no Quadro 3.1 (Grilo et al., Aceite para publicação).

A determinação da baridade da cal é apresentada no Quadro 4.1 do capítulo 4, juntamente com a descrição do ensaio.

Quadro 3.1 - Composição química (em % de massa) da NHL3.5 (Grilo et al., Aceite para publicação).

NHL3.5	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	LOI*
[%]	5,70	1,84	1,22	0,02	1,0	0,08	0,49	0,14	0,03	1,0	62,0	26,0

(*) Perda ao fogo

3.2.2. Areias

Na preparação das argamassas foram utilizados três tipos de areias siliciosas lavadas e graduadas, com diferentes granulometrias; a mistura de areias era composta volumetricamente por 1:1,5:1,5 de APAS12 (areia grossa), APAS20 (areia média) e APAS30 (areia fina); estas areias foram adquiridas em areeiro e utilizadas em estado seco.

Os valores característicos das areias, tais como a sua baridade e a análise granulométrica, foram determinados anteriormente por outros autores (Fontes, 2013) e (Massena, 2011) no âmbito dos projetos *METACAL* e *LIMECONTECH*. O ensaio de granulometria encontra-se descrito no capítulo 4.



Figura 3.1 -Areias utilizadas

3.2.3. Resíduo de tijolo furado (T1) e resíduo de ladrilhos de revestimento (T2)

Decorrente do aproveitamento de resíduos de tijolos cerâmicos que foram moídos em pó, em granulometria fina, e adicionados às argamassas em adição percentual relativa à massa do ligante, foi utilizado o pó de tijolo (T1) (Figura 3.2). O valor da baridade do pó de tijolo (T1) encontra-se no Quadro 4.1, juntamente com a descrição do ensaio.

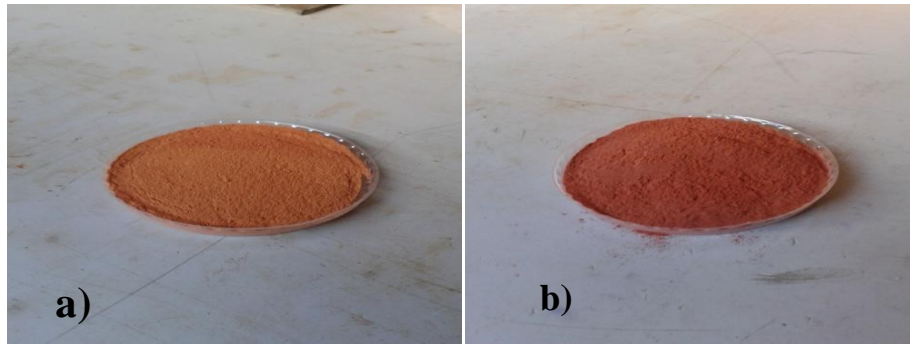


Figura 3.2 - Pó de tijolo (T1) (a) e ladrilho T2 (b)

O resíduo cerâmico T2 que foi utilizado na formulação das argamassas é um resíduo de construção obtido de desperdícios de ladrilhos cerâmicos utilizados na substituição dos elementos de fachada existentes no Departamento de Engenharia civil da FCT-UNL (Figura 3.2b). Estes resíduos foram recolhidos e tratados através de um processo de moagem, sendo depois separados em diferentes granulometrias. Neste estudo a granulometria utilizada foi a mais fina. O valor da baridade do resíduo cerâmico (T2) encontra-se no Quadro 4.1 do capítulo 4.

Fontes (Fontes, 2013) avaliou a reatividade pozolânica deste resíduo através do Ensaio de Chapelle. Apresenta-se no Quadro 3.2 comparativo com esse valor, assim como o de um metacaulino reativo comercial analisado através do mesmo método.

Quadro 3.2 - Reatividade pozolânica do resíduo cerâmico T2 e de um metacaulino comercial (Fontes, 2013).

Quantidade de Ca(OH)_2 fixado (mg)		
Ensaio	Mk	T2
1	1493	325
2	1403	253
3	1290	214
4	1242	172
5	1281	298

Mk – Metacaulino comercial; T2 – Resíduo cerâmico T2

“As quantidades de Ca(OH)_2 fixado (mg) pelo metacaulino, resultados dos ensaios realizados no LNEC no âmbito do projeto METACAL, e para o resíduo cerâmico. Apesar da dispersão de valores, que não se encontram dentro dos 10% de dispersão admitidos pela norma NF P 18-513:2010 [AFNOR, 2010], é possível constatar e concluir que o resíduo cerâmico tem um reduzido potencial pozolânico, como era aliás espectável.” (Fontes, 2013).

3.2.4. Água

A água utilizada nas misturas, foi obtida diretamente da rede pública, as quantidades utilizadas foram previamente definidas antes das amassaduras; em seguida foram realizados ensaios de consistência por espalhamento, de modo a garantir a trabalhabilidade da argamassa de acordo com o pretendido.

3.3. Produção de Argamassas

Para esta campanha experimental foram produzidas nos laboratórios do DEC-FCT/UNL cinco amassaduras diferentes, tendo um traço volumétrico de 1:4 de cal hidráulica natural NHL3.5, com adições de massa de resíduo de tijolo T1 e de resíduo de ladrilho T2 nas percentagem de 10% e 25% da massa de ligante.

Na produção das argamassas foi utilizada a mesma quantidade de areia em todas as amassaduras, bem como a mesma quantidade de água, variando apenas, e como já foi referido, a quantidade de material de adição introduzido nas amassaduras.

As argamassas foram designadas segundo a percentagem e tipo de resíduo adicionado, designadamente:

NHL - Argamassas de cal hidráulica natural de referência com traço volumétrico 1:4.

NHL_10T1 - Argamassas de cal hidráulica natural de traço volumétrico 1:4 com 10% de adição de resíduo de tijolo em relação à cal.

NHL_25T1 - Argamassas de cal hidráulica natural de traço volumétrico 1:4 com 25% de adição de resíduo de tijolo em relação à cal.

NHL_10T2: Argamassas de cal hidráulica natural de traço volumétrico 1:4 com 10% de adição de resíduo de ladrilho em relação à cal.

NHL_25T2: Argamassas de cal hidráulica natural de traço volumétrico 1:4 com 25% de adição de resíduo de ladrilho em relação à cal.

A composição das argamassas é apresentada no quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Composição das Argamassas

Argamassa	Massa [g]						Água [ml]	Adição de resíduo por cal [%]
	Apas 12	Apas 20	Apas 30	T1	T2	NHL 3,5		
NHL	1129,6	1686	1665,6	0,0	0,0	585,3	950	0
NHL_10T1	1129,6	1686,0	1665,6	58,5	0,0	585,3		10
NHL_10T2	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	58,5	585,3		10
NHL_25T1	1129,6	1686,0	1665,6	146,3	0,0	585,3		25
NHL_25T2	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	146,3	585,3		25

3.3.1. Amassaduras

Para a realização das argamassas seguiu-se o procedimento previamente definido no âmbito do projeto METACAL (Faria, 2011).

Inicialmente foram pesadas as areias secas, a cal hidráulica natural NHL3.5 e os resíduos, começando pelas areias de granulometria maior até à pesagem da própria cal, de acordo com as quantidades previamente definidas, numa balança com precisão de 0,001g; posteriormente a mistura foi homogeneizada manualmente e mediu-se a quantidade de água necessária com o auxílio de uma proveta graduada.

Em seguida colocou-se a mistura seca na misturadora mecânica de laboratório adicionando-se a água previamente medida nos primeiros segundos; a primeira fase da mistura decorreu durante 150 segundos, após os quais se interrompeu para remover manualmente a argamassa nos bordos e base da cuba, retomando-se em seguida a mistura durante mais 30 segundos (Fig. 3.3).

3.3.2. Provetes prismáticos

Foram produzidos provetes de 40x40x160 (mm³), em moldes metálicos aos quais foi previamente aplicado óleo descofrante para facilitar a desmoldagem (Fig. 3.4).



Figura 3.3 - Pesagem dos materiais(a); mistura manual (b); sequência da amassadura (c)

As argamassas foram colocadas nos moldes em duas camadas sendo cada uma compactada através de 20 pancadas executadas através de um compactador mecânico (Fig. 3.5). Após a compactação rasaram-se os moldes com o auxílio de uma régua metálica de modo a retirar os excessos. Os provetes foram então colocados dentro de sacos de polietileno durante 7 dias, após os quais 9 provetes de cada composição seguiram para as respectivas curas; os provetes foram ainda numerados de modo a facilitar a sua identificação.



Figura 3.4 - Preparação dos Moldes para os Provetes prismáticos

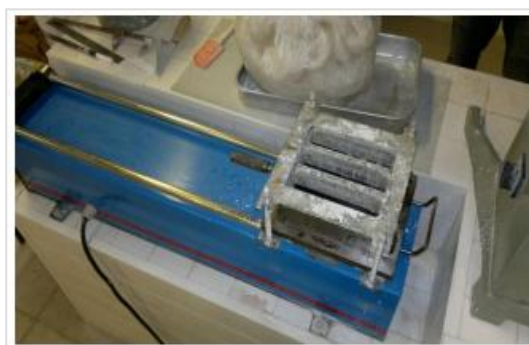


Figura 3.5 - Compactação das amassaduras no molde

3.3.3. Provetes de argamassa sobre tijolo

Foram realizados provetes de argamassa com 1,5 cm de espessura aplicados sobre tijolo furado de 7cm.

Para a produção dos provetes, os tijolos foram colocados dentro de um molde que os envolveu até 1,5 cm acima da sua face e esta foi aspergida com água. De modo a simular a aplicação em obra, a argamassa foi deixada cair sobre dos tijolos de uma altura de 70 cm; esta distância foi garantida com a colocação de um segundo molde colocado sobre o primeiro.

Após a aplicação da argamassa foi retirado o segundo molde e rasada a argamassa com o auxílio de uma régua metálica, produzindo assim provetes de 1,5 cm de espessura sobre o tijolo.



Figura 3.6 – Preparação de tijolo para aplicação das argamassas



Figura 3.7 - Provete de Argamassa Sobre Tijolo

3.4. Execução de reboco sobre murete de tijolo

Previamente à execução dos rebocos foi necessário construir o parque de muretes da Estação de Exposição Natural de Revestimentos da FCT UNL. O processo construtivo do parque de muretes é descrito no capítulo 4, juntamente com a avaliação da trabalhabilidade das argamassas e a aplicabilidade dos rebocos no estado fresco.

3.5. Condições de cura

Esta campanha experimental tem como objetivo estudar a evolução das características das argamassas de cal hidráulica NHL3.5 quando expostas a ambientes diversos; para tal foram definidos três tipos de cura: cura standard (ST), cura com aspersão de água inicial (SP) e cura marítima (M). Os provetes de argamassa aplicada sobre tijolo foram expostos às três curas, enquanto os prismas de argamassa foram apenas colocados sobre o efeito da cura marítima e standard.

Os rebocos foram efetuados em murete em exposição natural a Sul e Norte, localizados na Estação de Ensaio de Revestimentos no Campus da FCT UNL.

3.5.1. Cura Standard (ST)

Para garantir uma cura de referência após as amassaduras, os provetes ainda nos moldes foram inseridos em sacos de polietileno; foram desmoldados ao fim de 5 dias e após os quais foram colocados na sala climatizada da Secção de Construção e Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil DEC-FCT/UNL, onde ficaram sujeitos a uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura constante de $20 \pm 3^\circ\text{C}$, tal como é preconizado na norma europeia EN 1015-11:1999 (CEN, 1999).



Figura 3.8 - Cura Standard

3.5.2. Cura de Aspersão Inicial (Sp)

Os provetes expostos à cura por aspersão diária inicial foram logo a seguir à moldagem colocados nas condições de $HR = 65 \pm 5\%$ e $T = 20 \pm 3^\circ$, com a variante que do segundo ao quinto dia de cura foram aspergidos diariamente com água. Sendo efetuadas seis aspersões por tijolo. Esta cura pode facilmente ser reproduzida em obra, à exceção da manutenção da temperatura e humidade relativa.



Figura 3.9 - Cura de aspersão

3.5.3. Cura Marítima (M)

De modo a avaliar o efeito das condições marítimas sobre as argamassas em estudo, os provetes foram colocados na estação experimental do LNEC no Cabo Raso, Cascais, a cerca de 25 metros do Oceano Atlântico, onde ficaram expostos à aspersão natural de água do mar, bem com ao nevoeiro salino criado naturalmente na zona.

Seguindo o procedimento *METACAL* (Faria, 2011) os provetes prismáticos foram colocados num suporte especial, onde ficaram na vertical com as bases sobrelevadas em relação ao solo e os topos protegidos por prismas cerâmicos; os provetes de argamassa sobre tijolo ficaram colocados na vertical segundo a sua maior direção.

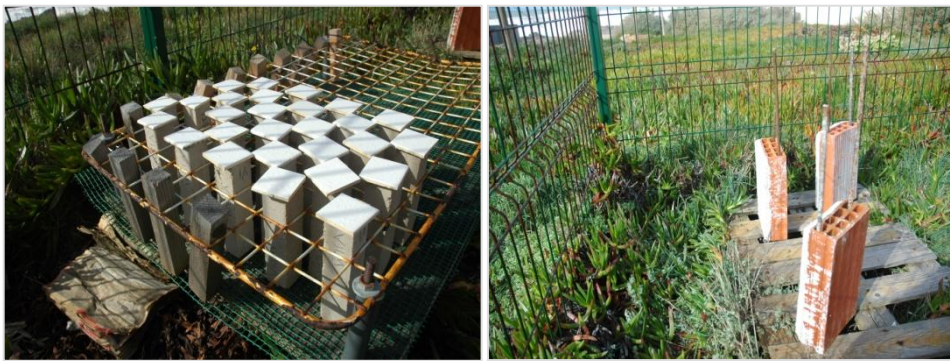


Figura 3.10 - Provetes em exposição marítima na Estação experimental do LNEC no Cabo Raso.

3.5.4. Cura de exposição natural na FCT UNL

Para avaliar o comportamento das argamassas em condições de utilização reais; os rebocos de argamassa foram aplicados sob cura feita em exposição natural na Estação de Exposição Natural de Revestimentos da FCT UNL, a partir de Novembro de 2013, data em que se conseguiram reunir todas as condições necessárias para a execução dos rebocos.

Embora o murete seja constituído por uma alvenaria de tijolo furado e de argamassa de assentamento de traço volumétrico 1:4 de cimento, admite-se que as características do tijolo furado isolado não se afastam muito das do murete.



Figura 3.11 – Estação de Exposição natural de Revestimentos

4. ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Todos os ensaios em seguida descritos foram realizados nos laboratórios do DEC-FCT/UNL. As argamassas foram avaliadas no estado fresco e no estado endurecido, em provetes prismáticos e em provetes de argamassa sobre tijolo. Os ensaios foram realizados segundo a ordem apresentada, sendo que o primeiro ensaio a realizar em cada idade em provetes prismáticos foi o da determinação do módulo de elasticidade dinâmico; em seguida iniciaram-se os ensaios destrutivos de resistência à tração por flexão e compressão; desses ensaios foram obtidos meios provetes que foram utilizados nos ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem, porosidade aberta e resistência à ação de sulfatos, foram ainda guardados provetes para ensaios futuros (Figura 4.1).

Relativamente aos provetes de argamassa sobre tijolo, foram efetuados ensaios de condutibilidade térmica, velocidade de propagação de ultrassons e absorção de água a baixa pressão.

Neste capítulo serão também analisados e representados os resultados obtidos durante a campanha experimental. Em primeiro lugar serão analisados os resultados obtidos na caracterização das argamassas em estado fresco, seguidamente são apresentados os resultados obtidos na caracterização do estado endurecido.

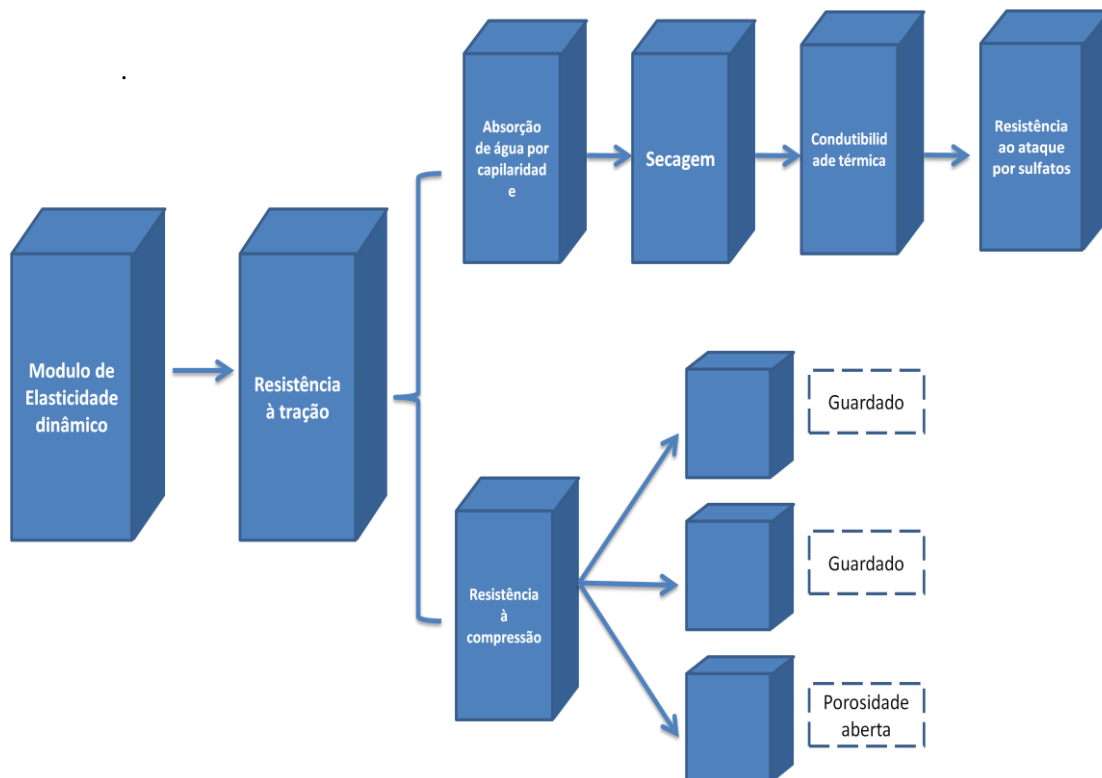


Figura 4.1 - Organização experimental dos provetes prismáticos

4.1. Caracterização das Matérias-primas

4.1.1. Análise granulométrica dos agregados

Análise granulométrica por peneiração

Seguindo a norma NP EN 933-1:2000 (IPQ, 2000) o ensaio de análise granulométrica foi realizado no âmbito dos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH*. Os materiais foram os mesmos utilizados na realização dos trabalhos experimentais das dissertações dos engenheiros João Grilo (Grilo, 2013) e Teresa Fontes (Fontes, 2013).

O ensaio foi realizado através do processo de peneiração mecânica, utilizando um conjunto de peneiros de granulometria pré-definida colocados de modo decrescente em relação à dimensão da abertura das malhas. Analisando as massas retidas em cada peneiro é possível determinar a curva granulométrica dos agregados, bem como a máxima e mínima dimensão dos mesmos.

Realizando o somatório das massas retidas em cada peneiro é possível traçar a curva granulométrica de cada agregado (Figura 4.2) em percentagem do material acumulado passado.

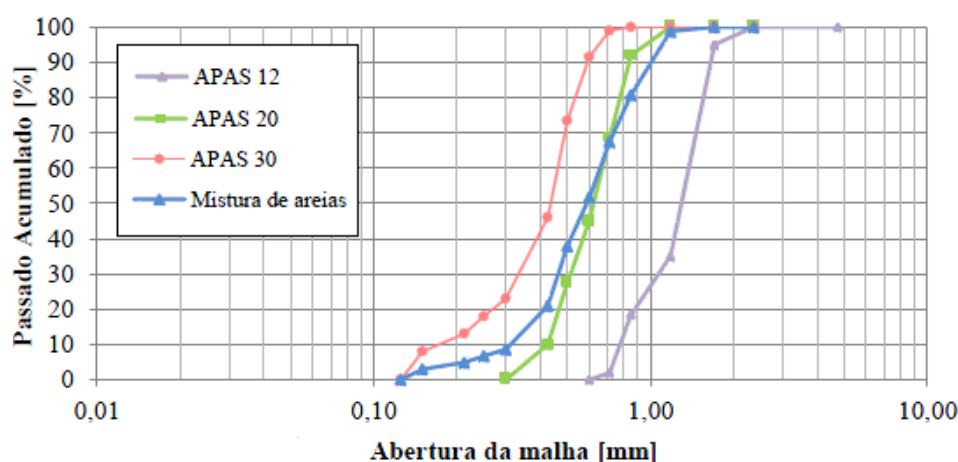


Figura 4.2- Curvas granulométricas da mistura das areias (Massena, 2011)

Análise granulométrica por difração laser

Foi realizada a análise por difração laser, às amostras de resíduos cerâmico T1 e T2, no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, ITECons, pela Eng.^a Gina Matias com recurso a um equipamento Mastersizer 2000, no âmbito do projeto EXPL/ECM-COM/0928/2012.

A análise granulométrica por difração laser permite conhecer a distribuição do tamanho das partículas da amostra.

O equipamento utiliza dois raios laser, com ângulos de incidência diferentes, que ao colidirem com as partículas sofrem desvios; o ângulo dos desvios sofridos pelos raios laser é inversamente proporcional à dimensão da partícula que os refrata; logo, quanto maiores os desvios sofridos, menor será a dimensão da partícula. A análise dos resultados é feita através de um software próprio associado ao equipamento, os dados são depois apresentados num gráfico semi-logarítmico onde é representado o volume de partículas que compõem a amostra, segundo os seus diâmetros.

Apresentação de resultados

Na Figura 4.3 e Figura 4.4e são apresentadas as distribuições do tamanho das partículas de resíduo cerâmico T1 e T2 respetivamente.

Resíduo T1

Observando a Figura 4.3, verifica-se que a dimensão das partículas do resíduo T1, encontram-se distribuídas entre os 0,4 μ m e os 280 μ m, com cerca de 55% do volume de partículas situado entre os 60 μ m e os 160 μ m, e apresentando um pico aos 105 μ m

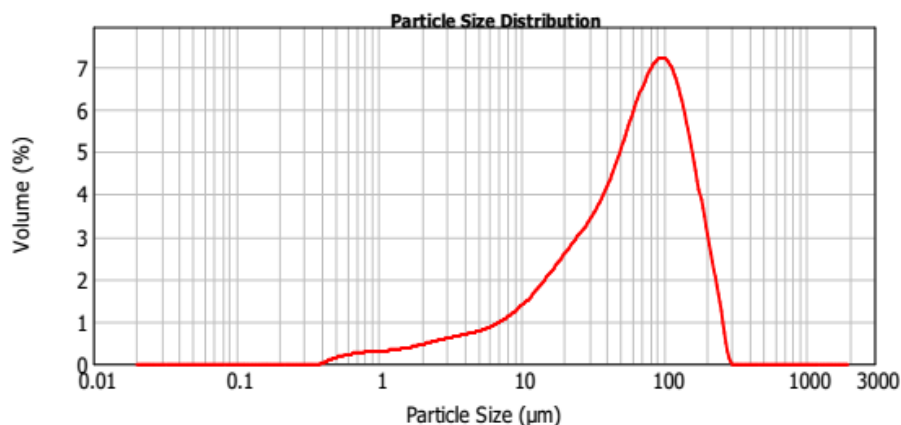


Figura 4.3 - Granulometria por difração laser ao resíduo T1

Resíduo T2

Na análise à distribuição de partículas do resíduo T2 verifica-se que a distribuição da dimensão das mesmas encontra-se entre os 0,4 a 700 μ m. Observa-se ainda que o volume de partículas encontra-se dividido em duas zonas; entre os 20 μ m e os 120 μ m encontram-se cerca de 45 % do volume das partículas, enquanto 25% situam-se entre os 275 μ m e 600 μ m, apresentando picos de diâmetros nos 70 μ m e 450 μ m.

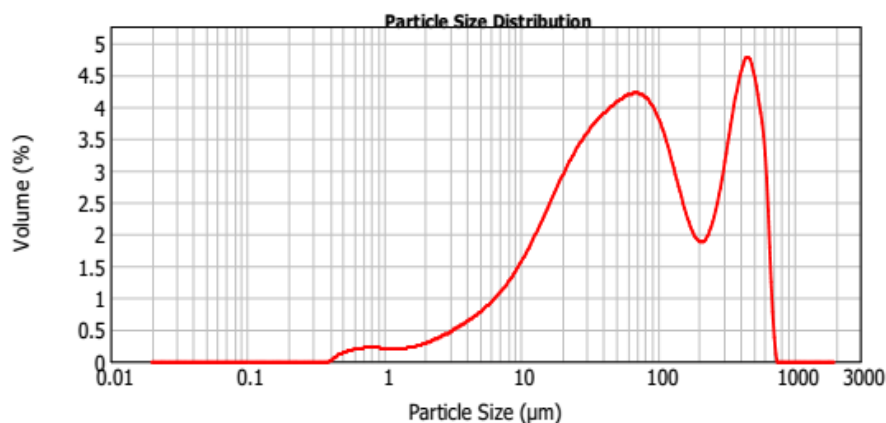


Figura 4.4 – Granulometria por difração laser ao resíduo T2

Analisando os resultados apresentados pela Figura 4.3 e Figura 4.4, verifica-se que o resíduo T2 apresenta uma maior quantidade de partículas finas que o resíduo T2, pelo que, no que respeita à superfície específica, será de esperar um maior potencial pozolânico por parte do resíduo T2. Em resíduos finos, com partículas de dimensão inferior a $75\mu\text{m}$, verifica-se um ganho efetivo de hidraulicidade nas argamassas (Matias et al., 2013).

4.1.2. Baridade

Descrição do ensaio

A baridade representa a massa por unidade de volume aparente; através desta grandeza é possível calcular a massa necessária de cada um dos elementos da argamassa, de forma a obter o traço volumétrico desejado (relacionando o traço ponderal com o traço volumétrico).

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002). O material é inicialmente colocado dentro de um funil cônico, com o orifício inferior obstruído; seguidamente é deixado cair para o interior de um copo metálico, com um volume de 749cm^3 , previamente determinado. Depois rasou-se o material à superfície do copo e mediu-se a massa do recipiente com o material no interior.



Figura 4.5 - Determinação da baridade

Conhecendo previamente o volume do recipiente, é possível determinar a baridade através da seguinte equação:

$$\text{Baridade} = \frac{(m_3 - m_0)}{V} [\text{Kg}/\text{cm}^3]$$

Equação 4.1

Em que:

m_3 : massa do recipiente cheio com o material [kg];

m_0 : massa do recipiente [kg];

V: volume do recipiente [cm^3].

Apresentação de Resultados

No Quadro 4.1 são apresentados todos os valores das baridades dos constituintes das argamassas. As areias apresentam uma baridade superior em relação aos restantes constituintes, sobretudo quando analisada a mistura de areias; no extremo oposto encontra-se a cal hidráulica natural, com a menor massa por unidade de volume. Entre os resíduos verifica-se que a baridade do resíduo de tijolo é inferior à do resíduo de ladrilho.

Quadro 4.1 - Baridade dos Constituintes

Baridade [g/cm^3]		
Cal Hidráulica	NHL 3,5	0,732
Resíduo cerâmico	T1	0,942
Resíduo cerâmico	T2	1,058
Areia APAS 12	Ar 12	1,412
Areia APAS 20	Ar 20	1,405
Areia APAS 30	Ar 30	1,388
Mistura areias	-	1,463

4.1.3.Consistência por Espalhamento e Relação água/ ligante

Descrição do ensaio

A consistência por espalhamento é uma propriedade utilizada, por forma a avaliar a trabalhabilidade das argamassas em estado fresco. O ensaio foi realizado tendo por base a norma EN 1015-3 (CEN, 1999).

Antes de iniciar o ensaio, a mesa de espalhamento foi humedecida, tal como o molde cónico e o pilão; seguidamente introduziu-se a argamassa no interior do molde colocado no centro da mesa de espalhamento. A introdução da argamassa fez-se por duas camadas; em cada camada foram executadas um mínimo de 10 inserções do pilão para eliminação de vazios. Concluída a introdução das argamassas rasou-se a superfície do molde e em seguida

retirou-se o molde cuidadosamente. Foram dadas 15 pancadas através da rotação da manivela da mesa de espalhamento, após as quais mediu-se o diâmetro da argamassa em duas direções opostas da mesa de espalhamento.



Figura 4.6 – Ensaio de consistência por espalhamento

Quadro 4.2 - Traço volumétrico, ponderal e relação água/ligante das argamassas

Argamassas	Traço volumétrico		Traço ponderal		A:(NHL+T)
	(NHL+T):Agr	NHL:T:Agr	NHL:Agr	NHL:T:Agr	
NHL	1:4	1:0:4	1:7,7	1:0:7,7	1,62
NHL_10T1	1:3,7	1:0,08:4	1:7	1:0,1:7,7	1,48
NHL_10T2	1:3,7	1:0,07:4	1:7	1:0,1:7,7	1,48
NHL_25T1	1:3,3	1:0,19:4	1:6,1	1:0,25:7,7	1,30
NHL_25T2	1:3,4	1:0,17:4	1:6,1	1:0,25:7,7	1,30

Apresentação de Resultados

Para cada argamassa foram realizadas três amassaduras, para a realização de todos os provetes necessários. Em cada uma das amassaduras foi efetuado o ensaio de consistência por espalhamento. Na Figura 4.7 estão representados o valor médio e o desvio padrão resultante das três amassaduras de cada argamassa.

Analisando a Figura 4.7 verifica-se que as amassaduras compostas por resíduo T1 apresentam os maiores valores de espalhamento, enquanto as amassaduras com o resíduo T2 têm os valores de espalhamento mais baixos. Nota-se uma tendência crescente nas argamassas de resíduo T1 com o aumento da percentagem de adição; por outro lado as argamassas de resíduo T2 apresentam uma tendência decrescente com o aumento de adição de resíduo.

Todas as argamassas apresentam uma consistência por espalhamento numa gama de valores entre os 159,3mm e os 162,5 mm, sendo a média de 161,8mm e o correspondente desvio padrão de 2,8mm.

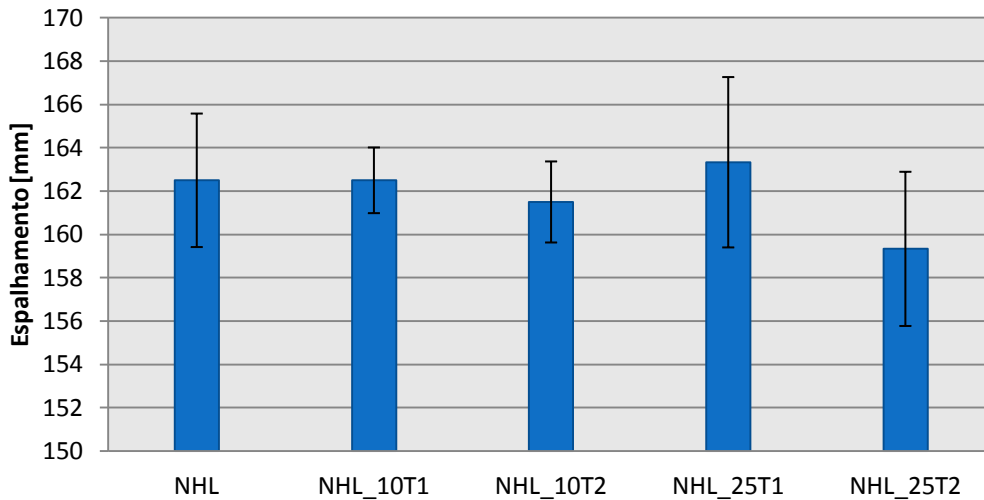


Figura 4.7- Consistência por espalhamento

Uma forte influência nos valores deste ensaio é o operador; neste caso os ensaios foram efetuados sempre pela mesma pessoa de modo a garantir uma maior certeza nos resultados.

4.1.4. Retenção de Água

Descrição do ensaio

A retenção de água de uma argamassa é uma característica importante no seu desempenho. Quando aplicada, uma argamassa perde parte da sua água por evaporação ou através da absorção pelo suporte; desta forma a capacidade de reter água de uma argamassa torna-se importante, influenciando a sua hidratação, a sua microestrutura e, logo, a sua durabilidade após a aplicação.

O ensaio tem por base a norma EN 1015-8 (CEN, 1999). Inicialmente procedeu-se à pesagem do molde metálico e das folhas de papel de filtro numa balança de precisão 0,001g.

Seguidamente o molde foi preenchido com a argamassa; rasou-se a sua superfície retirando o excesso de argamassa e pesou-se o conjunto molde/argamassa. Cobriu-se a superfície da argamassa com 2 gazes de algodão com formato circular e colocou-se o papel de filtro por cima destas. Cobriu-se o conjunto com um vidro quadrado de 5mm de espessura e inverteu-se o molde sobre uma superfície plana, colocando-se sobre ele um peso de 2kg durante 10 minutos (Figura 4.8). Findos os 10 minutos, inverteu-se novamente o conjunto, retirou-se e pesou-se novamente o papel de filtro (Figura 4.9), calculando-se a quantidade de água retida.



Figura 4.8 - Preparação do molde para ensaio de retenção de água.



Figura 4.9 - Pesagem do papel de filtro

A percentagem de água presente na argamassa colocada no molde é obtida pela Equação 4.2:

$$m_a = \frac{a_g \times (m_c - m_v)}{\sum_{i=1}^n C_i + a_g}$$

Equação 4.2

Onde :

m_a : massa de água que constitui a argamassa colocada no molde [g];

a_g : massa de água usada na amassadura [g];

C_i : massa de cada um dos constituintes utilizados [g];

m_c : massa do molde com argamassa [g];

m_v : massa do molde vazio [g].

A retenção de água obtém-se através da Equação 4.3:

$$R = \frac{m_a - (m_h - m_f)}{m_a} \times 100$$

Equação 4.3

Onde:

r : retenção de água (%);

m_a : massa de água que constitui a argamassa colocada no molde [g];

m_h : massa de 8 folhas de papel de filtro no final do ensaio [g];

m_f : massa de 8 folhas de papel de filtro secas [g].

Apresentação de Resultados

Na Figura 4.10 são apresentados os valores da retenção de água das argamassas em estudo. Para cada amassadura foi realizado um ensaio de retenção de água; neste caso os valores apresentados não representam a média das três amassaduras mas sim um valor singular obtido com cada uma.

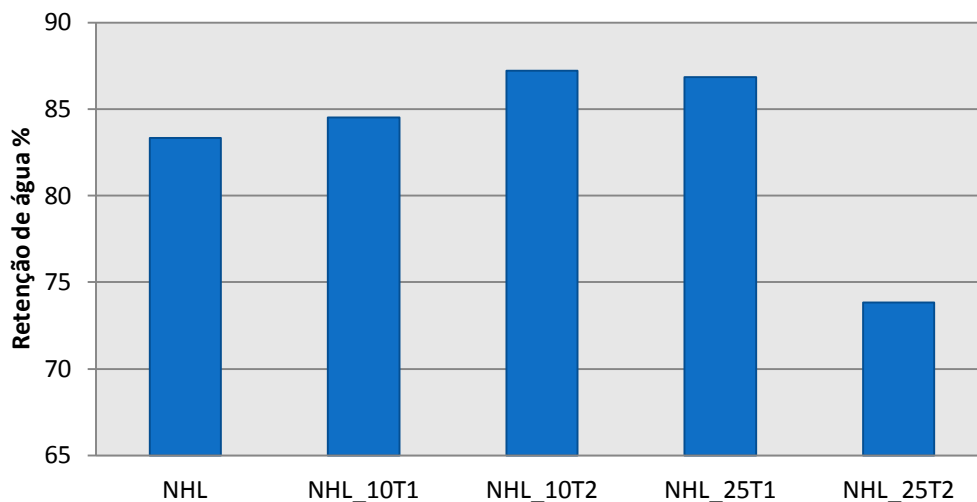


Figura 4.10 - Retenção de água

Quando analisada a Figura 4.10 verifica-se uma maior capacidade de retenção de água nas argamassas com adição de resíduos. Com base nos valores obtidos, relativamente ao resíduo T2 ocorre um aumento da retenção de água com a adição de 10% de resíduo e uma drástica redução com a adição de 25%.

Da análise do resultado de NHL_25T2 seria de esperar um valor superior, próximo do obtido por NHL_10T2; tal não sucedeu e o facto dos valores obtidos decorrem de uma única amostra torna-os menos representativos e com um grau de erro maior em relação ao desejado. O valor médio das argamassas ensaiadas situa-se nos 83,1%.

4.1.5. Massa Volúmica da argamassa fresca

Descrição do ensaio

Com este ensaio pretende-se determinar a massa volúmica das argamassas em estado fresco. O procedimento teve como base a norma EN 1015-6 (CEN, 1998a).

Preencheu-se um recipiente com volume de 1 dm³ e 1,121kg de peso com a argamassa a ensaiar; em seguida rasou-se a superfície para retirar os excessos e pesou-se o conjunto.

Calculando a diferença entre as massas do copo e do conjunto é possível determinar a massa da argamassa. A determinação da massa volúmica foi realizada com auxílio da Equação 4.4



Figura 4.11 - Recipiente com argamassa em estado fresco

$$\rho = \frac{m_t - m_r}{V_r}$$

Equação 4.4

Onde:

ρ : massa volúmica da argamassa em estado fresco [kg/m³];

m_t : massa do recipiente cilíndrico totalmente preenchido com argamassa [kg];

m_r : massa do recipiente cilíndrico vazio [kg];

V_r : volume do recipiente cilíndrico [m³].

Apresentação de Resultados

Na Figura 4.12 encontram-se representados os valores obtidos da massa volúmica das argamassas em estado fresco. Verifica-se que a maior massa volúmica corresponde à argamassa de referência NHL.

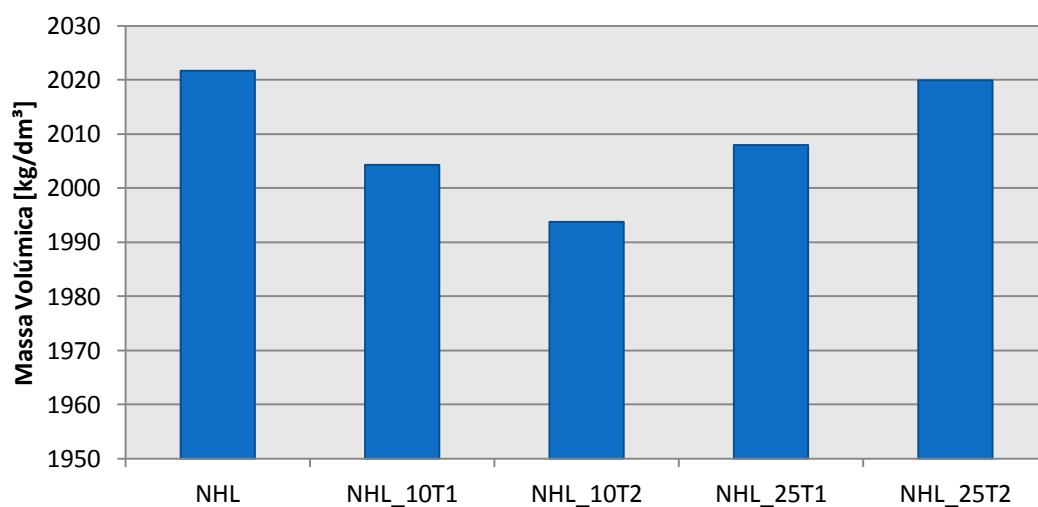


Figura 4.12 - Massa volúmica

Da análise dos resultados verifica-se que a massa volúmica das argamassas situa-se entre os $1,994\text{kg/dm}^3$ e os $2,022\text{kg/dm}^3$, com um valor médio de $2,010\text{kg/dm}^3$.

4.1.6. Teor em Ar

Descrição do ensaio

A determinação do teor em ar das argamassas teve por base a norma EN 1015-7 (CEN, 1998b). A argamassa foi colocada no interior de um recipiente próprio, pertencente ao equipamento de determinação do teor em ar; a introdução da argamassa foi feita em duas camadas, sendo cada uma compactada através de quatro pancadas manuais executadas em lados opostos do recipiente. Após o preenchimento do recipiente rasou-se a sua superfície com auxílio de uma régua metálica, retirando deste modo os excessos de argamassa; em seguida colocou-se o topo do equipamento sobre o recipiente fixando-o através de grampos metálicos próprios para esse fim, incluídos no equipamento.

Em seguida foram abertas as duas válvulas do dispositivo e introduziu-se água no sistema por uma delas até que saísse pela outra válvula. Após o preenchimento do sistema bombeou-se ar para o reservatório até o manómetro se encontrar na posição zero; fecharam-se as duas válvulas e libertou-se a válvula de escape até o ponteiro estabilizar. No final do processo registou-se o teor em ar indicado no manómetro.



Figura 4.13 - Ensaio de determinação do teor em ar

Apresentação de Resultados

Observando a Figura 4.14 verifica-se que as argamassas com adições na sua composição, apresentam um teor em ar superior ao registado pela argamassa de referência NHL.

Nas argamassas com adições T1 e T2, observa-se uma tendência crescente do teor em ar com o aumento da percentagem de adição. As argamassas com 25% de resíduos adicionados registam deste modo os valores mais elevados de teor em ar.

Ainda assim o teor em ar das argamassas situa-se no gama de valores entre os 2,4% e os 3,5%, com um valor médio de 3,2%.

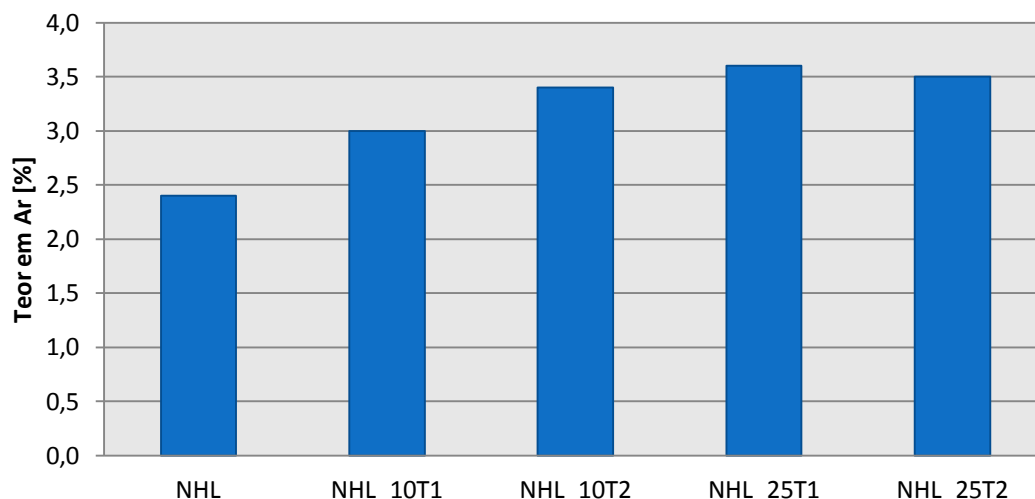


Figura 4.14 - Teor em ar

4.2. Estado Endurecido – Provetes Prismáticos

Seguidamente são apresentados os ensaios e resultados obtidos em estado endurecido das argamassas em estudo nas diferentes curas e às idades de 28, 90 e 180 dias.

Em primeiro lugar são expostos os ensaios e resultados referentes aos provetes prismáticos, seguindo-se os provetes aplicados sobre o tijolo.

4.2.1. Módulo de Elasticidade Dinâmico

Descrição do ensaio

Uma vez que o equipamento de determinação do módulo de elasticidade dinâmico é bastante sensível ao teor de água, os provetes provenientes da cura marítima (M) foram colocados durante 24 horas em condições da cura standard (65% de HR) antes da realização do ensaio, para que uma eventual pluviosidade e teor elevado em água dos provetes não impossibilitasse a realização do ensaio. O ensaio teve como base a norma NP EN 14146:2006 (IPQ, 2006) medindo-se a frequência de ressonância fundamental, através do equipamento “ZEUS Ressonce Meter” ao qual está associado um software de cálculo.

O provete foi colocado no suporte próprio do equipamento com um dos topos em contacto com o emissor de ultrassons. No programa de cálculo foram inseridas as dimensões e massa do provete a ensaiar. Após a introdução dos dados dá-se início ao ensaio e o equipamento calcula automaticamente o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) em MPa. Todos os provetes foram ensaiados quatro vezes, efetuando-se duas medições por cada.



Figura 4.15 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

O programa determina o valor do módulo de elasticidade dinâmico em MPa automaticamente, com base na Equação 4.5:

$$E_d = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6}$$

Equação 4.5

Onde:

E_d : Módulo de elasticidade mecânico [MPa];

L : Comprimento do provete [mm];

f_0 : Frequência de ressonância longitudinal [Hz];

ρ : Massa volúmica do provete [N/m³];

g : Aceleração gravítica [m/s²].

Apresentação de Resultados

O módulo de elasticidade dinâmico quantifica a capacidade de deformação de um sólido. No caso das argamassas esta grandeza revela-se importante, visto que a capacidade de deformação de uma argamassa é fundamental para a compatibilidade com o suporte. No caso dos edifícios antigos, as alvenarias apresentam normalmente uma deformabilidade significativa, quando comparadas com suportes modernos; pelo que será importante ter em conta a rigidez da argamassa adotada.

Resultados aos 28 dias

Da análise da Figura 4.16 é possível concluir que as argamassas da cura ST apresentam uma menor deformabilidade em relação às mesmas composições sujeitas à cura M, com exceção das composições, NHL_25T1 e NHL_25T2.

Na cura ST as argamassas com adição de T1 e T2, apresentam uma tendência decrescente de E_{din} com o aumento da percentagem de adição; observa-se ainda que as argamassas com adições de 10% de resíduos apresentam valores superiores aos da argamassa de referência e restantes composições, com destaque para a NHL_10T2

Na cura M a tendência é inversa, observando-se um crescimento de E_{din} com o aumento das adições. Verifica-se ainda que as argamassas com adições de 25% de resíduo apresentam a menor deformabilidade em relação às restantes, destacando-se a NHL_25T2.

No entanto, todas as argamassas apresentam valores entre os 2000 MPa e os 2700 MPa, denotando uma deformabilidade interessante.

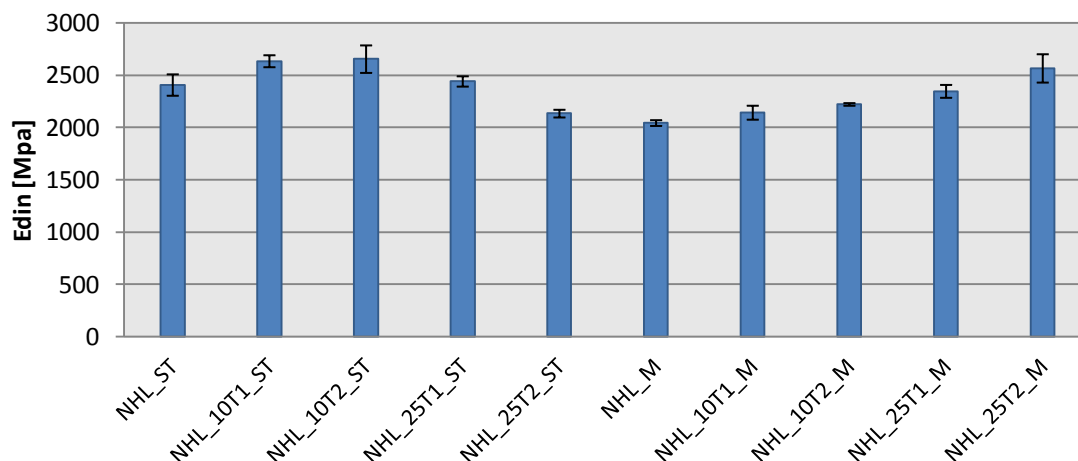


Figura 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Na cura M a argamassa de referência NHL, apresenta um menor valor de E_{din} , quando comparada com as restantes composições; ainda nesta cura destacam-se as argamassas NHL_10T1 e NHL25T2, com valores de E_{din} bastante semelhantes aos apresentados pelas argamassas da cura ST.

De um modo geral as argamassas da cura ST apresentam valores semelhantes entre si aos 90 dias de ensaio; não sendo possível destacar uma composição.

Aos 90 dias as argamassas apresentam valores na gama dos 2153 a 2688 MPa.

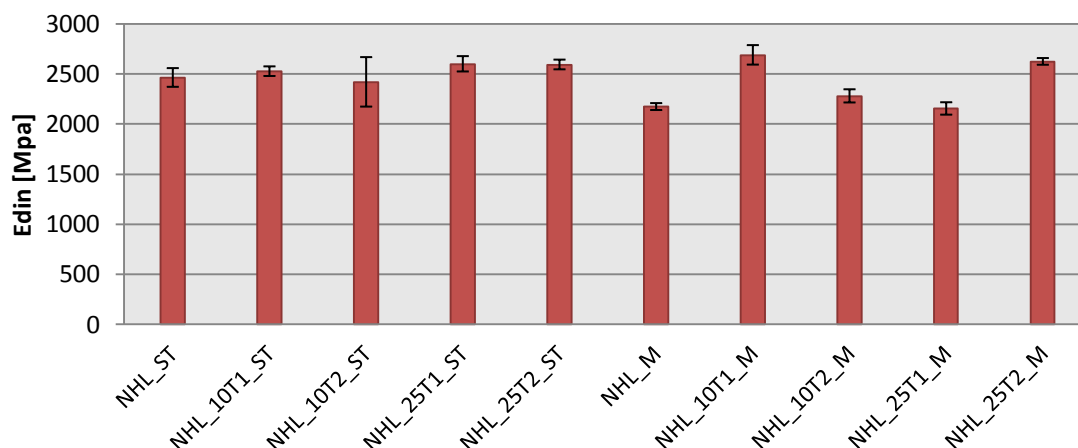


Figura 4.17 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias

Resultados aos 180 dias

Na Figura 4.18, são apresentados os valores de Edin obtidos aos 180 dias de cura. Da sua análise, é há semelhança do que foi observado nas idades anteriores, verifica-se que as argamassas sujeitas à cura ST registam valores de Edin superiores quando comparadas às mesmas composições provenientes da cura M.

Na cura ST destacam-se as argamassas NHL_10T1 e NHL_25T2, que apresentam uma rigidez ligeiramente superior às restantes.

Apesar dos valores obtidos pelas composições provenientes da cura M se encontrarem relativamente próximos, justifica-se salientar o comportamento das NHL_10T1 que à semelhança da cura ST, apresentam uma deformabilidade inferior à das restantes composições.

Aos 180 dias as argamassas apresentam valores de Edin entre os 1869MPa e 2775MPa.

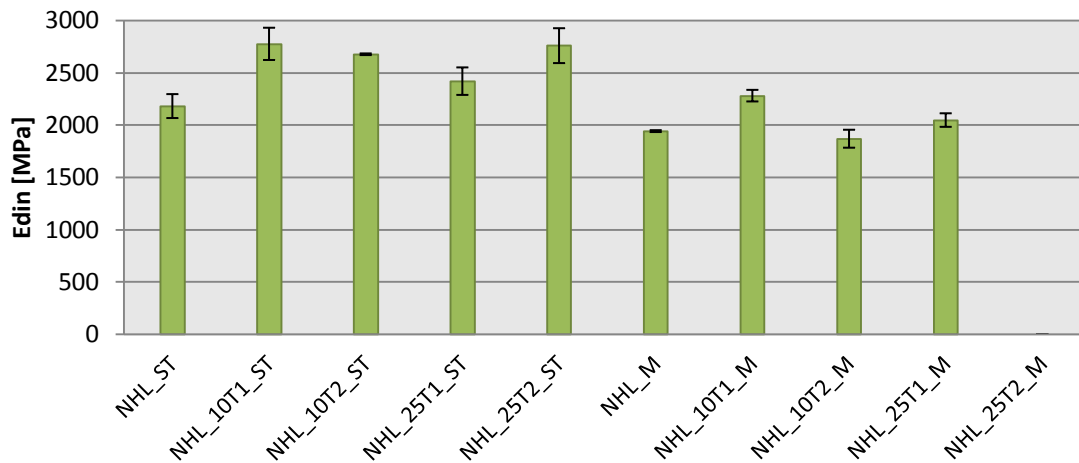


Figura 4.18 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias

Evolução dos resultados

Na Figura 4.19 são apresentados os valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico (Edin), para todas as argamassas em todas as idades.

Da análise da Figura 4.19 facilmente se conclui que as argamassas sujeitas à cura standard (ST) apresentam uma deformabilidade menor que as mesmas composições da cura marítima (M). As argamassas com adições de resíduo, apresentam valores distintos quando analisadas em ambas as curas.

Na cura ST verifica-se uma tendência decrescente do valor de Edin com o aumento da percentagem de adição de resíduos; esta tendência inverte-se quando se observa as mesmas argamassas na cura M.

Da análise entre argamassas com resíduos diferentes verificam-se comportamentos semelhantes em ambas as curas; de um modo geral a adição de resíduos leva a um aumento

de rigidez por parte das argamassas em todas as idades, quando comparadas com as respectivas argamassas de referência; não se verifica no entanto disparidade entre a adição de resíduos T1 e T2. Deve-se salientar o caso da argamassa NHL_25T2, que de modo geral apresenta valores semelhantes entre as duas curas

Não foi possível analisar a argamassa NHL_25T2 aos 180 da cura M, dada a degradação e apresentada pelos topos de todos os provetes que impossibilitaram a execução do ensaio.

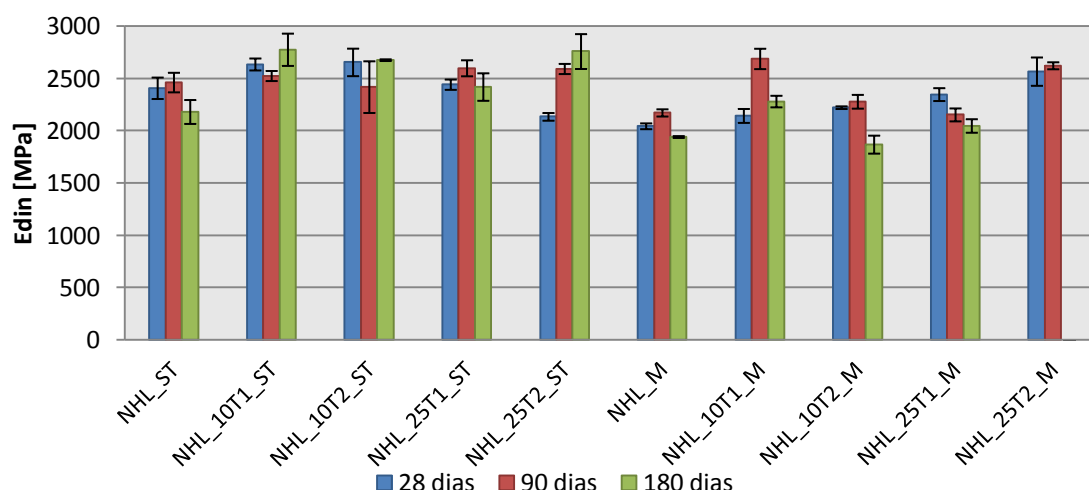


Figura 4.19 – Evolução do módulo de elasticidade dinâmico

4.2.2. Ensaio de resistência à tração por flexão

Descrição do ensaio

Após concluído o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, os provetes foram sujeitos ao ensaio de resistência à tração por flexão; tendo como base a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999).

Para o ensaio utilizou-se uma máquina universal Zwick/Rowell, com uma célula de carga de 2kN.

O ensaio consiste na aplicação de carga a uma velocidade de 0,2mm/min a meio vão do provete, que está apoiado em dois pontos distanciados por 100 mm (Figura 4.20).

A carga é aplicada numa das faces lisas do provete, tal como os apoios. O final do ensaio dá-se com a rotura do provete; sendo registado pelo software pertencente ao equipamento o valor da força máxima de tração F_t .

A resistência à flexão, dada em [MPa], é calculada através da Equação 4.6.



Figura 4.20 - Ensaio de resistência à tração por flexão

$$R_t = \frac{1,5 \times F_t \times L}{b^3}$$

Equação 4.6

Em que:

R_t : Resistência à flexão [MPa];

F_t : Carga máxima aplicada sobre o provete pela célula de carga [N];

b : Lado da secção quadrada do prisma [mm];

L : Comprimento do provete entre apoios [mm].

Apresentação de resultados

A análise da resistência à tração por flexão (R_t) permite inferir sobre a resistência à fendilhação das argamassas; de um modo geral uma argamassa com maior resistência à tração terá uma maior resistência à fendilhação.

Figura 4.23 são apresentados os valores médios e respetivo desvio padrão da resistência à tração por flexão (R_t), obtidos a partir de três provetes de cada argamassa, ensaiados nas idades de 28, 90 e 180 dias. Para melhor compreensão dos resultados obtidos são apresentados individualmente os resultados referentes a cada idade de cura.

Resultados aos 28 dias

Na Figura 4.21 encontram-se representados os valores de R_t obtidos aos 28 dias em ambas as curas. Da sua análise pode concluir-se que as argamassas da cura ST apresentam valores de R_t superiores em relação às mesmas composições sujeitas à cura M. Em ambas as curas verifica-se uma tendência crescente dos valores de R_t com o aumento da percentagem de adição de resíduos.

As argamassas com adições T1 apresentam, em ambas as curas, valores superiores aos obtidos pelas argamassas de referência NHL. Na análise das argamassas T2 observa-se

uma tendência de comportamento bastante semelhante ao registrado nas argamassas T1, embora com valores sempre inferiores

Destaca-se no entanto a argamassa NHL_25T2 que apresenta os valores de R_t mais elevados na cura ST; já na cura M a argamassa com 25% de adição de T1 apresenta um valor ligeiramente superior à NHL_25T2.

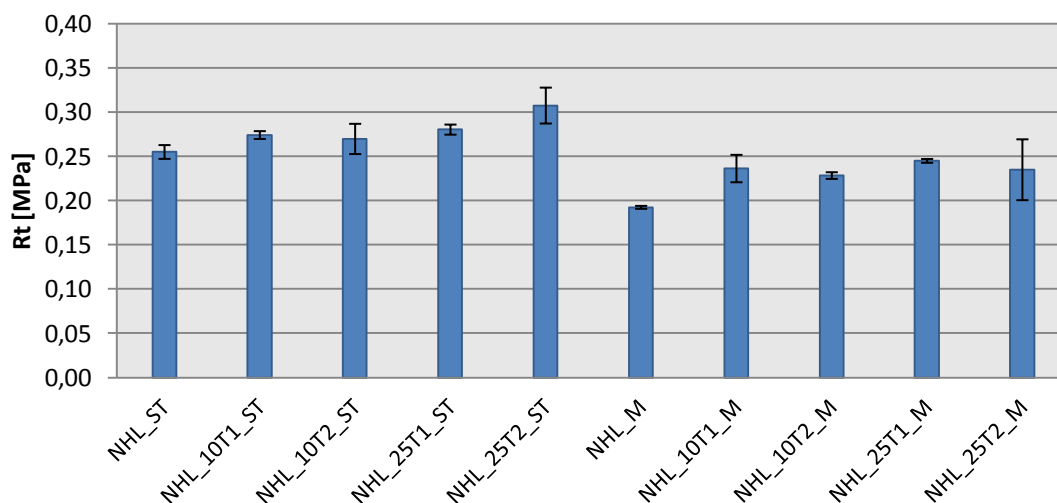


Figura 4.21 - Resistências à tração por flexão aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Da análise da Figura 4.22, verifica-se que as argamassas T1 e T2 apresentam uma tendência crescente de R_t com o aumento das adições em ambas as curas, com a exceção das argamassas com 10% de ambos os resíduos em cura ST, face à argamassas de referência nessa cura, e a NHL_25T1_M.

Destaca-se a argamassa NHL_25T2 com as maiores resistências à flexão em ambas as curas.

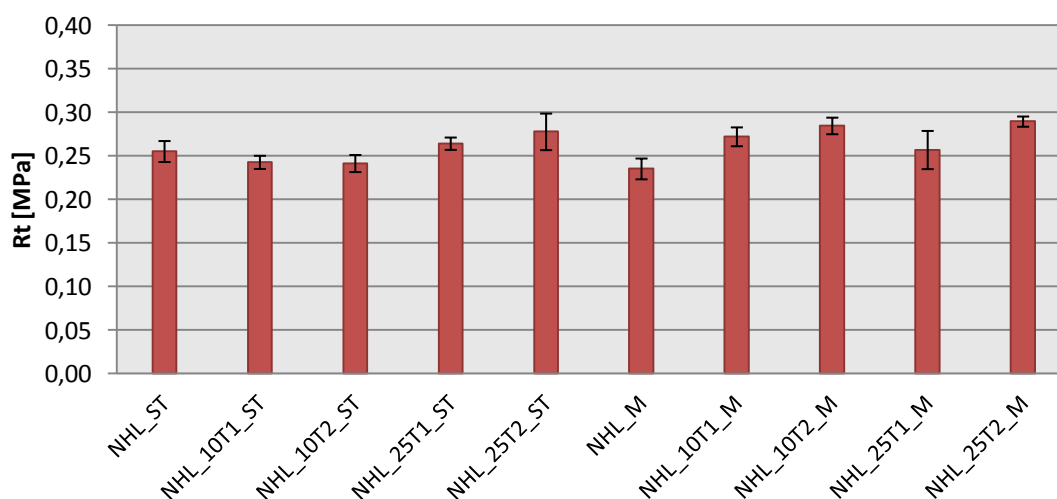


Figura 4.22 - Resistência à tração por flexão aos 90 dias

Resultados aos 180 dias

Na análise da

Figura 4.23 verifica-se que as argamassas da cura ST apresentam valores de R_t superiores aos registados nas argamassas sujeitas à cura M.

Na cura ST todas as argamassas apresentam resistências maiores que a argamassas de referência; já na cura M apenas as NHL_10T1 apresentam uma R_t superior à NHL sem adições.

De um modo geral o resíduo T2 apresenta um melhor comportamento na cura ST verificando-se o inverso na cura M.

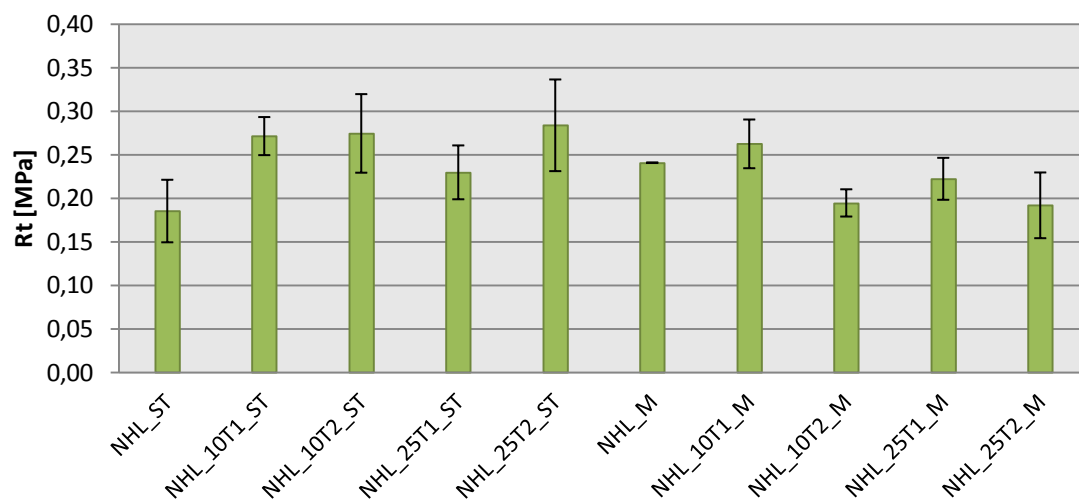


Figura 4.23 - Resistência à tração por flexão aos 180 dias

Evolução dos resultados

Na Figura 4.24 é apresentada a evolução dos resultados ao longo do tempo de cura. Da sua análise pode concluir-se que as argamassas da cura ST apresentam valores superiores às da cura M, expeto aos 90 dias em que as argamassas com adições cerâmicas de 10% T1 e 25% T1 e T2 apresentam resistências à tração superiores às das suas homólogas da cura ST.

As argamassas com adições cerâmicas T1 apresentam em todas as idades valores de R_t superiores aos das respetivas argamassas de referência, apenas a NHL_10T1_ST e NHL_25T1_M têm um valor de resistência menor que o da argamassa NHL de referência, aos 90 e 180 dias respetivamente.

Nas argamassas com adições T2 apenas se registam resistências inferiores às da argamassa de referência, quando sujeitas à cura M aos 180 dias.

Quando analisadas entre si as argamassas T1 e T2, observa-se que as composições com T2 apresentam resistências superiores às argamassas T1 quando sujeitas à cura ST. Já na cura M, a tendência é inversa.

Na grande maioria das argamassas, com a evolução da sua idade, o valor de R_t diminui ligeiramente. No caso de algumas composições sujeitas a cura M, isso é particularmente evidente composições NHL e NHL_10T1.

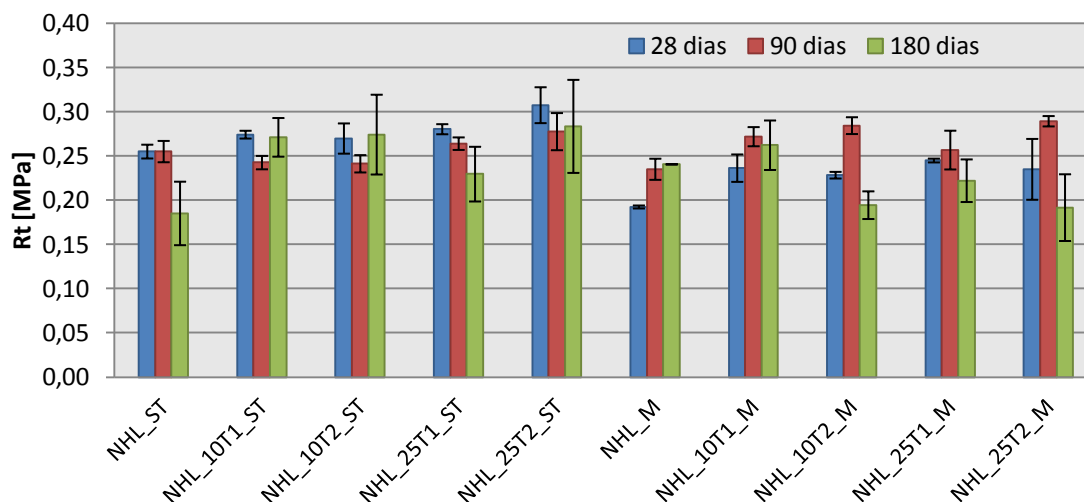


Figura 4.24 - Resistência à tração por flexão

4.2.3. Ensaio de Resistência à Compressão

Descrição do ensaio

Após a conclusão do ensaio de resistência por flexão efetuou-se o ensaio de compressão sobre a metade do prisma que evidenciou ter a secção da base menos regular; visto que uma base regular é melhor para o ensaio de absorção capilar.

O ensaio da resistência à compressão teve por base a norma EN 1015-11 (CEN, 1999), a mesma referida no ponto 4.2.2.

Para realizar o ensaio de resistência à compressão utilizou-se novamente a máquina universal Zwick/Rowell desta vez com uma célula de carga de 50kN. Colocou-se o provete num suporte metálico com secção 40mm x 40mm que garante o contacto eficaz entre a prensa e o provete, efetuado através das faces lisas do mesmo. O final do ensaio dá-se quando o provete atinge a rotura nesse momento é registado pelo software a força máxima de compressão, F_c .

O valor da resistência à compressão foi calculado através da dividindo a força máxima de compressão (em N) pela área de contacto (1600 mm^2).



Figura 4.25 - Ensaio de resistência à compressão

Apresentação de Resultados

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, a todas as idades. A resistência à compressão R_c de uma argamassa deve estar contida na mesma gama do suporte, onde seja aplicada, por forma a evitar o desenvolvimento excessivo de tensões.

Resultados aos 28 dias

Da análise da Figura 4.26, é possível verificar que aos 28 dias as argamassas com adições cerâmicas, apresentam valores de R_c maiores que as argamassas NHL de referência em ambas as curas.

Na cura ST as composições adicionadas apresentam valores bastante similares entre si, exceto a NHL_25T1.

Na cura M é notória a tendência crescente dos valores de R_c com o aumento das adições cerâmicas nas argamassas sujeitas à cura marítima; registando-se os maiores valores nas argamassas com adições de resíduo cerâmico T2.

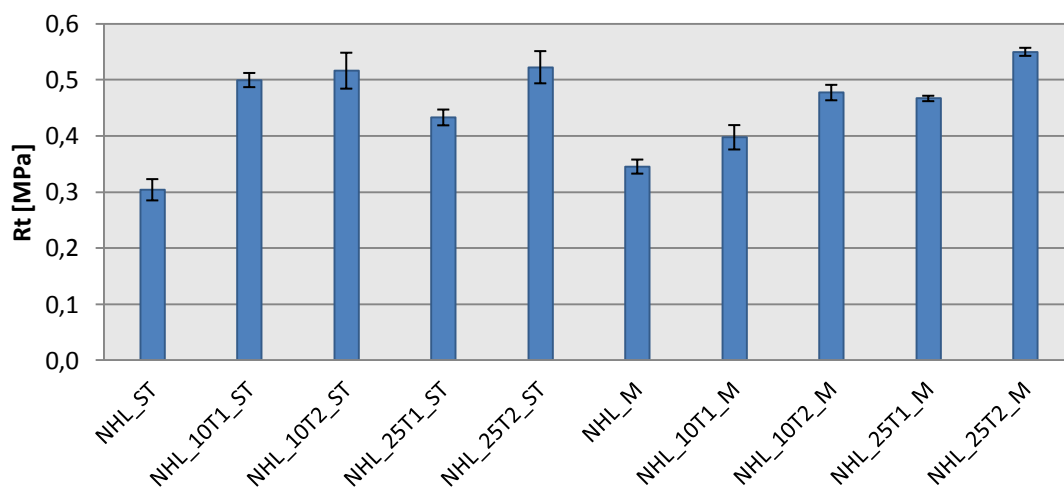


Figura 4.26 - Resistência à compressão aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Analisando a Figura 4.27, verifica-se que as argamassas com adições cerâmicas apresentam valores de R_c maiores que as respectivas argamassas de referência, em ambas as curas; com a exceção da composição NHL_25T1_M.

De um modo geral as argamassas da cura M apresentam valores de R_c maiores que as suas homólogas provenientes da cura ST; destacando a argamassa NHL_25T2 com as maiores resistências obtidas em ambas as curas.

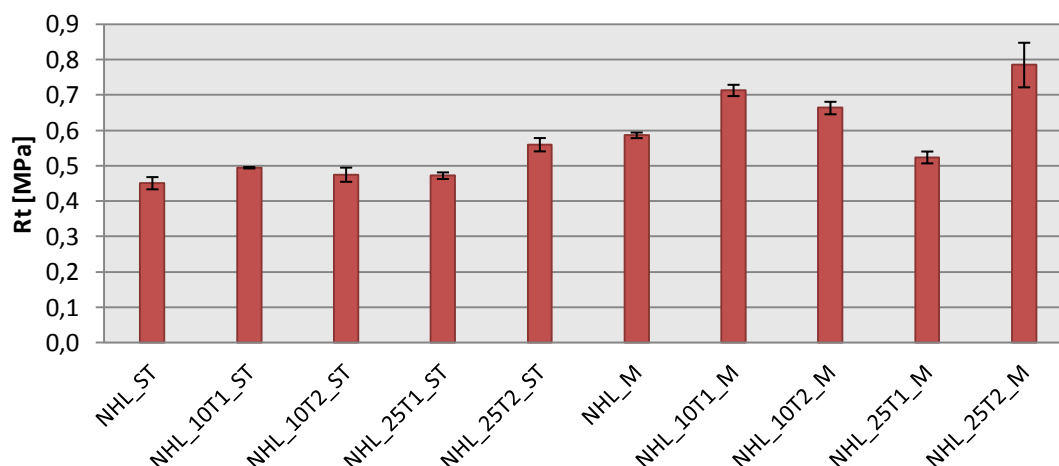


Figura 4.27 - Resistência à compressão aos 90 dias

Resultados aos 180 dias

Na Figura 4.28 são apresentados os resultados da R_c aos 180 dias; da sua análise é possível concluir que argamassa NHL_25T2 da cura ST é a que apresenta o maior valor de R_c . Em ambas as curas as argamassas com adições de resíduos apresentam valores de R_c superiores aos registados pelas argamassas de referência, exceto no caso da NHL_10T1 sujeita à cura M.

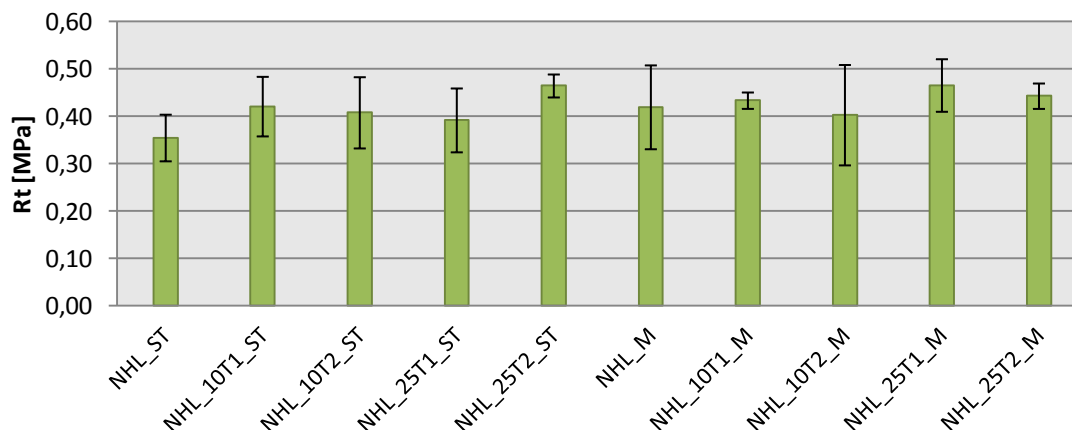


Figura 4.28 - Resistência à compressão aos 180 dias

Evolução dos resultados

Analisando a Figura 4.29 é possível constatar que os valores de resistência à compressão têm um pico aos 90 dias em todas as argamassas, com exceção das composições NHL_10T1 e NHL_10T2 da cura ST. Por outro lado o menor valor de R_c é obtido aos 180 dias na generalidade das argamassas.

Da análise das argamassas com adições cerâmicas T1 verifica-se que em todas as idades obtêm-se valores superiores aos das argamassas de referência nas respectivas curas, observando-se ainda uma tendência decrescente dos valores de R_c com o aumento da adição de resíduo cerâmico T1 na cura ST, enquanto no caso da cura M, existe uma inversão dessa tendência.

Analisando as argamassas com adições de resíduo cerâmico T2, observa-se uma resistência à tração superior à da argamassa de referência em todas as idades e curas, com a exceção da cura M aos 180 dias, na qual a argamassa NHL_10T2 apresenta uma R_c menor que a respetiva argamassa de referência; verifica-se ainda tendência crescente dos valores de R_c com o aumento da percentagem de resíduo adicionado.

Comparando as argamassas com adições cerâmicas verifica-se que, em todas as idades e curas, a argamassa com 25% de adição de T2 obteve valores médios de R_c superiores às restantes, exceto aos 180 dias em que NHL_25T1 apresenta uma resistência à compressão superior a NHL_25T2 quando sujeitas à cura M.

Resumindo às argamassas com adições cerâmicas na sua composição, estas apresentam resistências à compressão superiores às respetivas argamassas de referência em ambas as curas sobretudo no caso das argamassas adicionadas com 25% de T2.

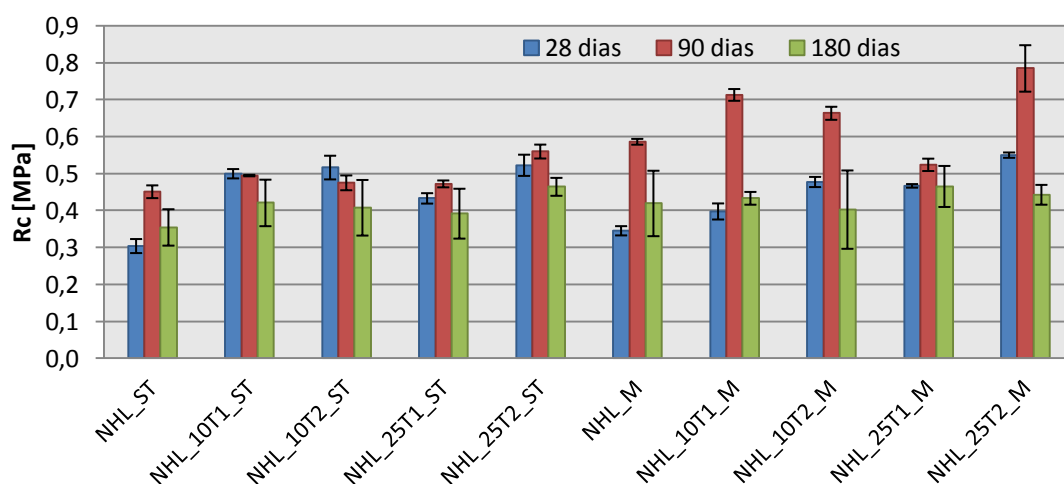


Figura 4.29 – Evolução resistência à compressão

4.2.4. Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Descrição do ensaio

O ensaio teve por base as normas EN 15801:2009 (CEN, 2009) e EN 1015-18:2002 (CEN, 2002). O ensaio decorreu numa sala climatizada nas condições de temperatura e humidade da cura standard; foram estudadas as metades de cada provete provenientes do ensaio de resistência à compressão por flexão. A caracterização foi feita por argamassa, obtendo-se uma média e desvio padrão de cada 3 provetes da mesma argamassa.

Previamente à realização do ensaio os provetes foram colocados durante 24h numa estufa a 60°C até atingirem uma massa constante (correspondente a uma variação de 0,1% de massa num intervalo de 24 horas).

Preparou-se uma caixa estanque, onde foi colocado um tabuleiro devidamente nivelado com uma rede plástica no fundo, garantindo o contacto da base do provete com a água; o tabuleiro foi preenchido com água até garantir uma lâmina de 0,5 cm acima do nível da rede.

Após retirado da estufa, cada provete foi envolvido em película aderente de polietileno para impermeabilizar as suas faces laterais, garantindo assim que a ascensão capilar de água fosse feita apenas unidireccionalmente.

De seguida foram pesados os provetes (instante t_0) numa balança de precisão 0,001g e colocados no tabuleiro; foram efetuadas pesagens aos provetes aos 5 min, 10 min, 15 min, 30 min e a cada hora durante as primeiras 5h do ensaio; sendo depois pesados diariamente até ser registada uma diferença de massa menor que 1% no intervalo de 24h. Durante o ensaio foi sistematicamente controlada a altura da lâmina de água, efetuando-se reposições do nível da mesma sempre que necessário; a tampa da caixa foi mantida fechada de modo a garantir a manutenção de um ambiente saturado no seu interior.



Figura 4.30 - Ensaio de capilaridade

Com os registos obtidos durante o ensaio construiu-se a curva de absorção capilar de cada provete, através da média dos provetes de cada argamassa e condição de cura.

Estas curvas apresentam, em abcissas, a raiz do tempo (em raiz de minutos) e, em ordenadas, a massa da quantidade de água absorvida em função da área da base dos provetes, tendo em conta a Equação 4.7:

$$m = \frac{m_i - m_0}{A}$$

Equação 4.7

Onde;

M: massa da quantidade de água absorvida [kg/m²];

m_i: massa do provete ao fim do tempo t_i [kg];

m₀ massa do provete seco no do tempo t₀ [kg];

A :área da seção do provete em contato com a água (0,04x0,04m) [m²].

O valor assintótico (VA) define o total de água que a argamassa/cura absorve por capilaridade (função do volume médio de metade do provete originalmente moldado, que se considera semelhante) e o declive do troço reto inicial da curva (passando ou não pela origem) define o coeficiente de capilaridade (CC) dessa argamassa/cura.

Assim, o coeficiente de capilaridade (CC) é determinado pela equação da recta, na fase inicial do gráfico.

$$y = m \times x + b$$

Equação 4.8

Onde,

m :coeficiente de capilaridade [kg/ (m². min^{1/2})];

y : valor da fase considerada inicial do fico [kg/ m²];

x : valor da fase considerada inicial do gráfico [min^{1/2}];

b: ordenada na origem, 0. [kg/ m²].

Apresentação de Resultados

Como referido anteriormente os resultados analisados nestes ensaios, são: o coeficiente de capilaridade e o valor assimptótico.

Na Figura 4.34 são apresentados os valores do coeficiente de capilaridade e na Figura 4.35 os valores assimptóticos obtidos nos ensaios; são ainda apresentadas as curvas de capilaridade aos 28, 90 e 180 dias.

Resultados aos 28 dias

Na Figura 4.31 são apresentados as curvas resultantes do ensaio aos 28 dias, nas primeiras 24h do ensaio; da sua análise verifica-se que as argamassas sujeitas à cura ST são as que absorvem menos quantidade de água; nomeadamente a NHL_10T2, apresenta a menor quantidade de água absorvida; no extremo oposto encontra-se a NHL_25T2 proveniente da cura M.

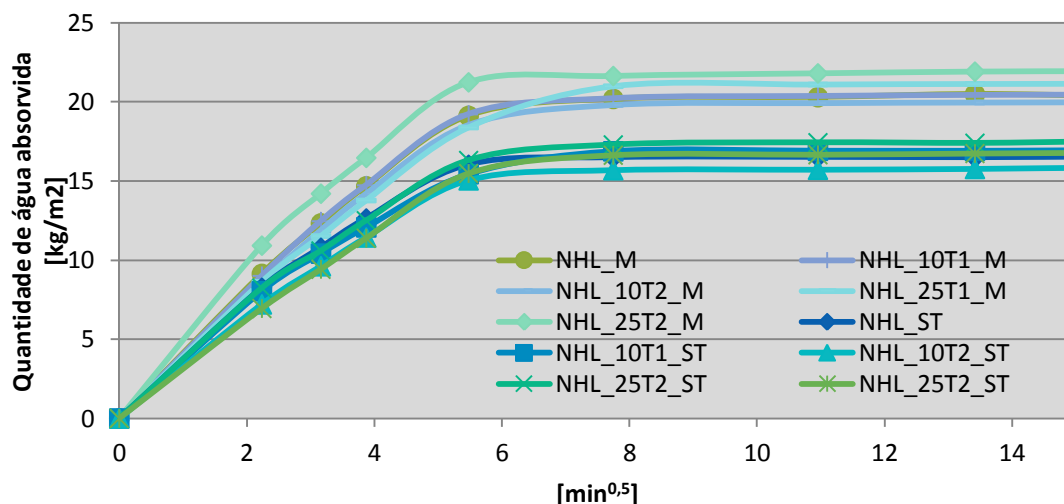


Figura 4.31 - Curvas de capilaridade aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Da análise das curvas apresentadas na Figura 4.32, verifica-se que as argamassas da cura ST apresentam uma maior velocidade de absorção aliada a uma menor capacidade de absorver água por capilaridade. Por outro lado as argamassas da cura M apresentam uma maior capacidade de absorção, atingindo a saturação mais tarde. A argamassa que absorve menor quantidade de água é a NHL_10T2 sujeita à cura ST, enquanto a argamassa NHL_25T1 da cura M é claramente a argamassa que absorve a maior quantidade de água.

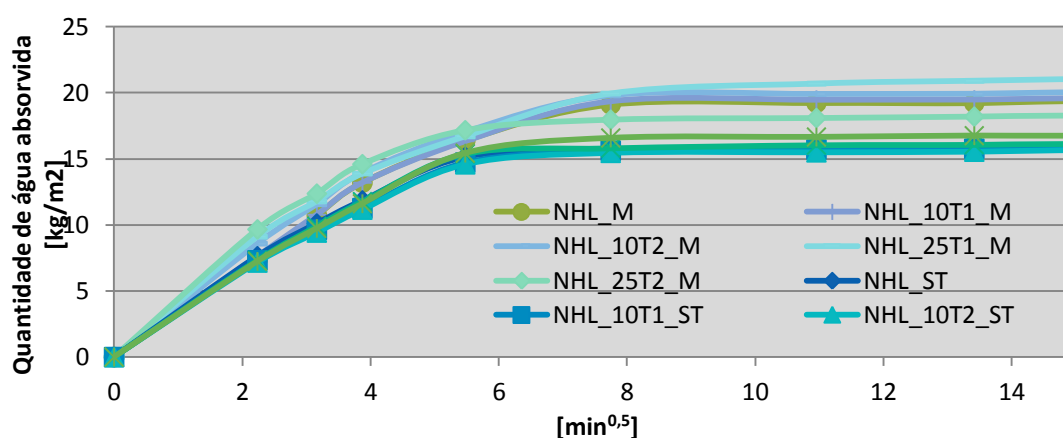


Figura 4.32 - Curvas de capilaridade aos 90 dias

Resultados aos 180 dias

Na Figura 4.33 são apresentadas as curvas de capilaridade aos 180 dias; da sua análise é possível concluir que as argamassas da cura ST são as que absorvem a menor quantidade de água por capilaridade e verificam uma menor velocidade de absorção. A argamassa que aos 180 dias registou o menor valor de água absorvida foi a NHL_10T2 da cura ST; no entanto a mesma argamassa quando sujeita à cura M apresenta a maior quantidade de água absorvida, atingindo a saturação mais rapidamente que as restantes.

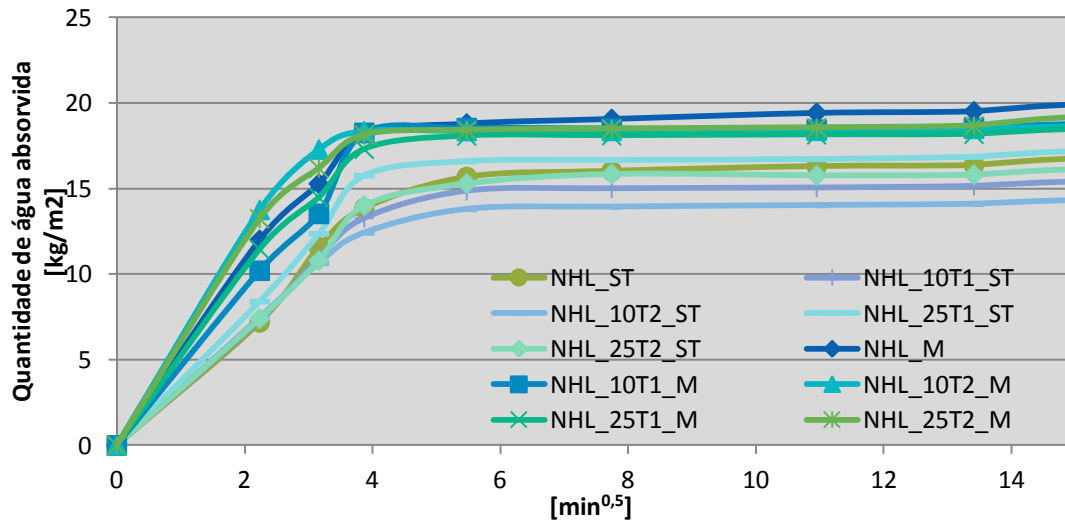


Figura 4.33 - Curvas de capilaridade aos 180 dias

Evolução de Resultados

Na Figura 4.34 e Figura 4.35 são apresentados os valores médios e respetivo desvio padrão do coeficiente de capilaridade e valor assintótico, registados aos 28, 90 e 180 dias.

Os resultados são apresentados sob forma de gráfico de barras, para ajudar a uma melhor compreensão da evolução dos resultados.

Analisando a Figura 4.34 verifica-se que os provetes sujeitos à cura M são aqueles que apresentam maiores CC; observa-se também que em todos os provetes o menor valor de CC dá-se aos 90 dias à exceção do provete NHL_10T2 da cura ST.

Analisando os resultados aos 180 dias verifica-se que a argamassa com maior CC é a de referência da cura M, enquanto a argamassa com 10% de adição de T2 da cura ST apresenta o valor mais baixo.

Da observação das argamassas com resíduo T1 verifica-se, que no caso das adições de 10%, os valores de CC são menores que os das argamassas de referência em todas as idades nos provetes sujeitos à cura ST; no caso da cura M os valores aproximam-se bastante, não existindo diferença entre a argamassa de referência NHL e NHL_10T1.

Nas argamassas com resíduos T2, verifica-se uma tendência crescente entre as adições e o valor de CC na cura ST, verificando-se valores inferiores aos das argamassas de referência apenas nas adições de 10%. Na cura M apenas aos 28 dias se regista uma tendência crescente entre os valores de CC e as adições de resíduo T2.

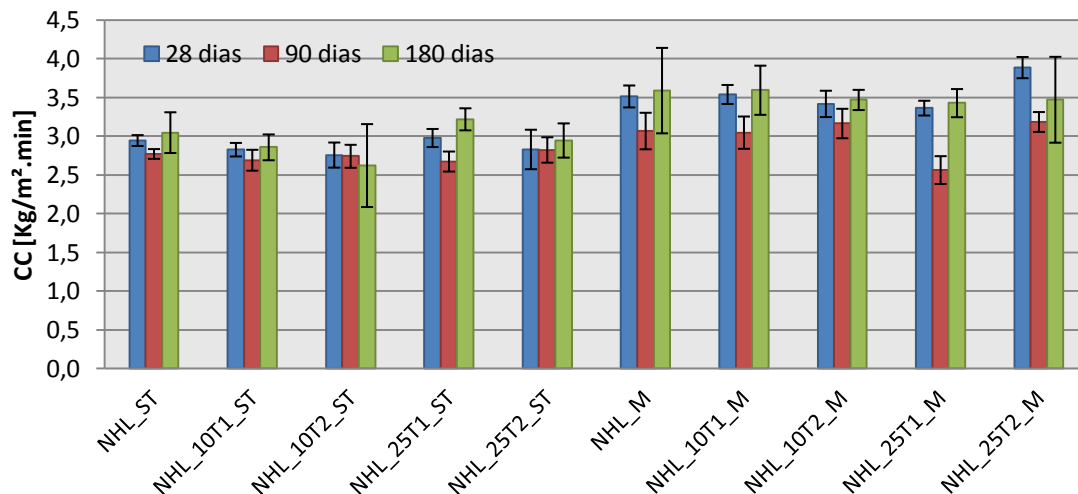


Figura 4.34 - Evolução do coeficiente de capilaridade

Na análise da Figura 4.35 verifica-se uma concordância entre o valor assintótico e o CC observado na Figura 4.34; as argamassas da cura M apresentam os maiores VA, o que revela uma maior capacidade de absorver água assim como uma maior velocidade.

Quando analisadas aos 180 dias a argamassa com maior capacidade de absorver água é a de NHL_M; a NHL_10T2_ST é a que apresenta a menor capacidade.

Resumindo, a argamassa com maior capacidade e velocidade de absorção de água é a argamassa de referência NHL proveniente da cura marítima (M); por outro lado a argamassa com menor absorção capilar é a NHL_10T2 sujeita à cura standard (ST).

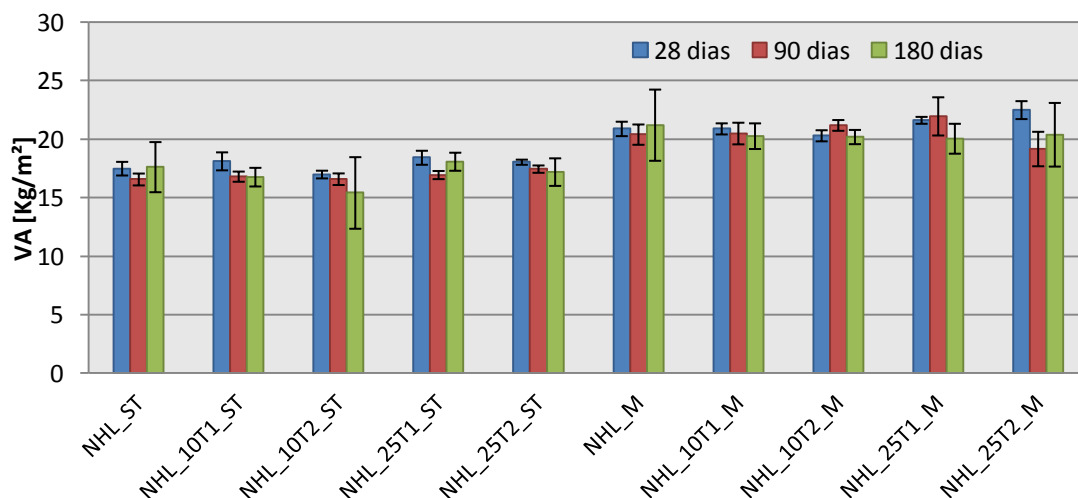


Figura 4.35 - Evolução do valor assintótico

4.2.5. Ensaio de Secagem

Descrição do ensaio

Após concluído o ensaio de absorção de água por capilaridade iniciou-se o ensaio de secagem. O seu procedimento foi baseado na especificação da RILEM (RILEM, 1980) e na norma italiana NORMAL 29/88 (CNR-ICR, 1988). O ensaio decorreu na mesma sala que o ensaio anterior, condicionada a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$, idênticas à cura standard (ST).

Foi mantida a película aderente nos provetes para garantir que a secagem fosse feita apenas pela secção do topo. Foram efetuadas pesagens numa balança de precisão 0,001g, a cada hora durante as primeiras 5h da secagem; após o primeiro dia efetuaram-se pesagens diárias até o ensaio perfazer 400h, momento em que os provetes apresentaram uma diferença de massa inferior a 0,01% em 24h.



Figura 4.36 - Ensaio de secagem

A partir dos dados recolhidos calculou-se o teor em água dos provetes através da Equação 4.9; com os valores do teor em água foi possível traçar a curva de secagem com o teor em água ou a massa de água em função da área de secagem (em ordenadas), e o tempo do ensaio (em abcissas):

$$w_t = \frac{m_i - m_0}{m_i}$$

Equação 4.9

Onde;

W_t : teor em água [%];

m_i : massa do provete no instante t_i [g];

m_0 : massa do provete seco [g].

Para a determinação do índice de secagem (IS), recorreu-se à Equação 4.10:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \left(\frac{w_{ti-1} + w_{ti}}{2} \right) \right]}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f}$$

Equação 4.10

Onde;

IS: índice de secagem [-];

ti: instante de ensaio i[h];

tf: tempo final de ensaio[h];

Wti: teor em água do provete no instante ti[%];

Q_{máx}: teor em água máximo do provete (instante inicial do ensaio) [%].

Foi determinado um índice de secagem (IS) para cada provete ensaiado, e só depois foi calculado o valor médio dos três por forma a obter um valor final que refletisse o comportamento da argamassa em relação ao processo de secagem a longo prazo.

Foi ainda determinada a taxa de secagem (TS) de cada provete, que foi obtida através do cálculo do declive do troço inicial da curva de secagem, correspondente às primeiras horas do ensaio, a TS foi analisada em cada provete e posteriormente determinou-se o valor médio de cada argamassa e o respetivo desvio padrão.

Apresentação de resultados

Da análise feita à secagem foi determinada a taxa de secagem e o respetivo índice de secagem de cada argamassa, nas idades de 28, 90 e 180 dias.

A taxa de secagem é obtida através do declive da reta correspondente ao troço inicial da curva de secagem, e traduz a velocidade de secagem de cada argamassa.

De uma forma geral são favoráveis argamassas que apresentem menores índices de secagem (IS) e maiores valores de taxa de secagem (TS), o que traduz uma argamassa com uma maior capacidade de secagem e uma mais rápida secagem inicial.

Resultados aos 28 dias

Da análise da Figura 4.37 e Figura 4.38 verifica-se que as argamassas sujeitas à cura ST são as que apresentam as menores taxas de secagem, à exceção da argamassa de referência NHL.

Observa-se nas argamassas da cura ST uma tendência decrescente dos valores da taxa de secagem com o aumento da percentagem de adição; em todas as composições adicionadas registam-se taxas de secagem menores que as das NHL sem adições.

Na cura marítima (M) todas as argamassas com adições cerâmicas apresentam taxas de secagem maiores que as das argamassas de referência NHL.

Em ambas as cura a argamassa que apresenta a menor taxa de secagem é a NHL_25T2.

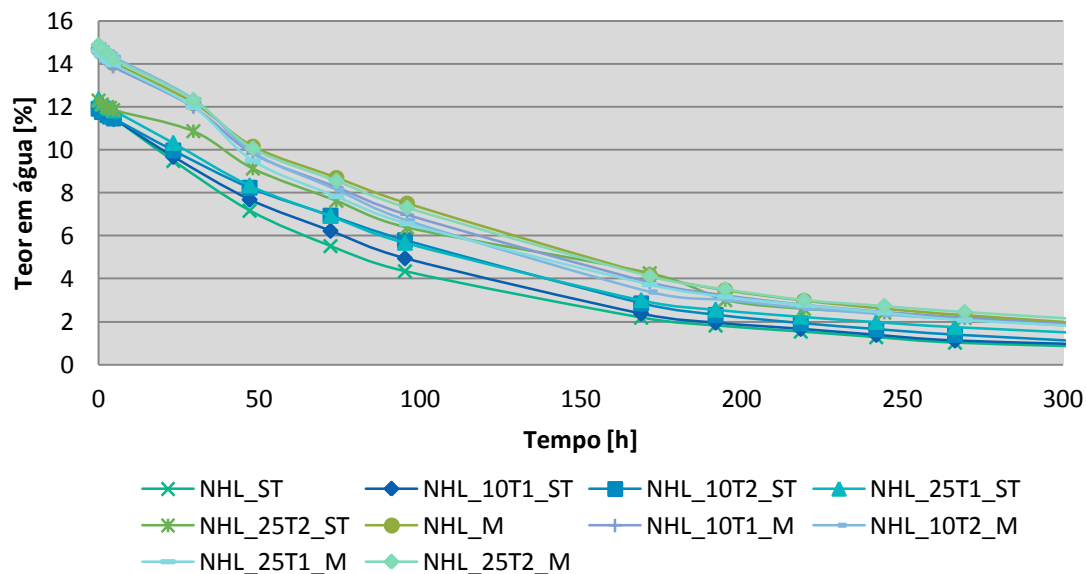


Figura 4.37 - Curva de secagem aos 28 dias

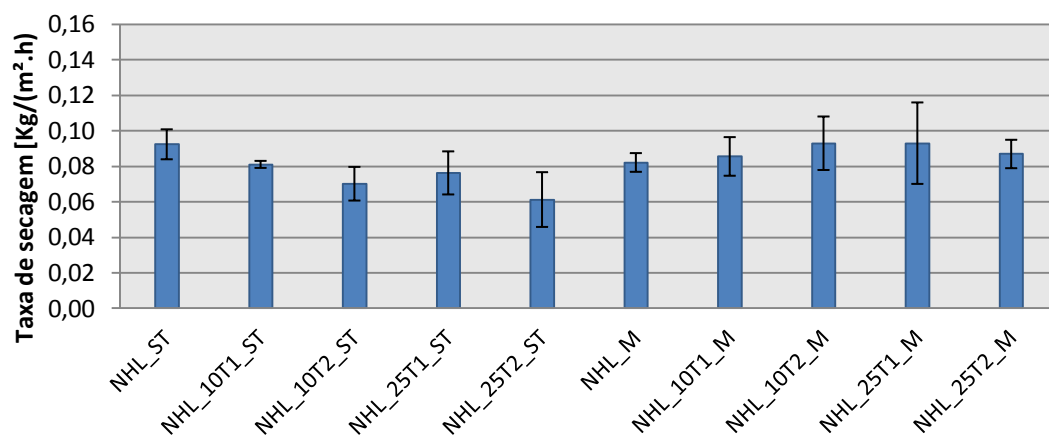


Figura 4.38 - Taxa de secagem aos 28 dias

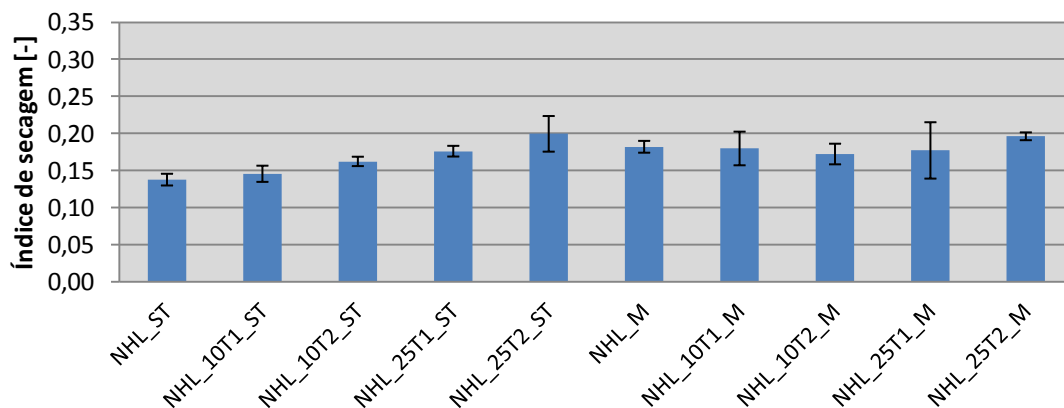


Figura 4.39 - Índice de secagem aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Analisando a Figura 4.40 e Figura 4.41, observa-se que as argamassas sujeitas à cura ST apresentam taxas de secagem próximas às registadas pelas argamassa de referência, exceto a NHL_10T1 com a menor taxa de secagem das argamassas da referente cura.

Da observação da cura M, verifica-se uma tendência crescente da taxa de secagem com o aumento da percentagem de resíduo presente nas argamassas. Em ambas as curas a argamassa NHL_25T2 é a que apresentam a maior taxa de secagem, por outro lado a NHL_10T2 é aquela com a menor taxa de secagem registada.

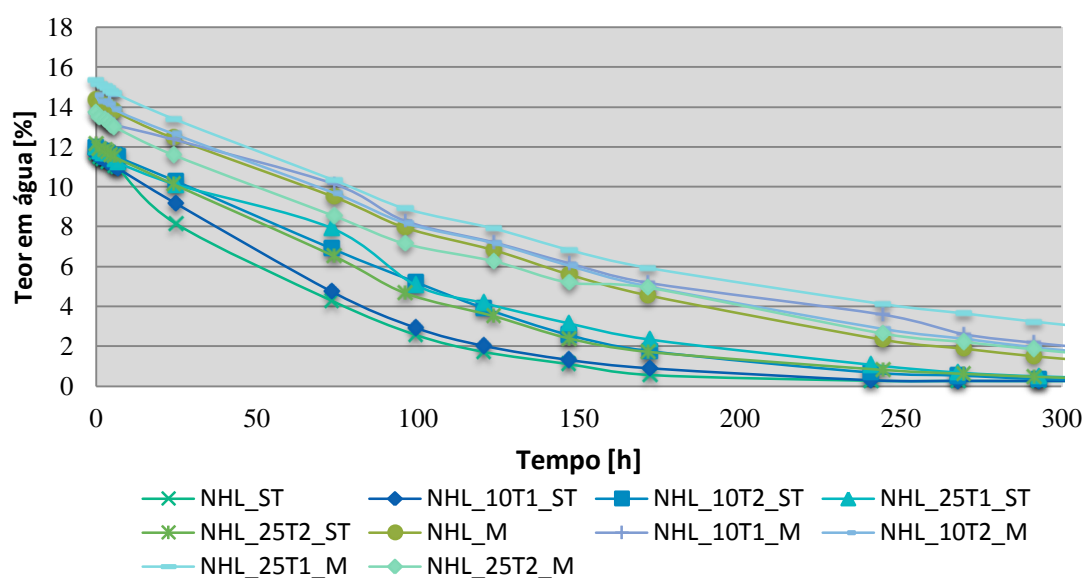


Figura 4.40 - Curvas de secagem aos 90 dias

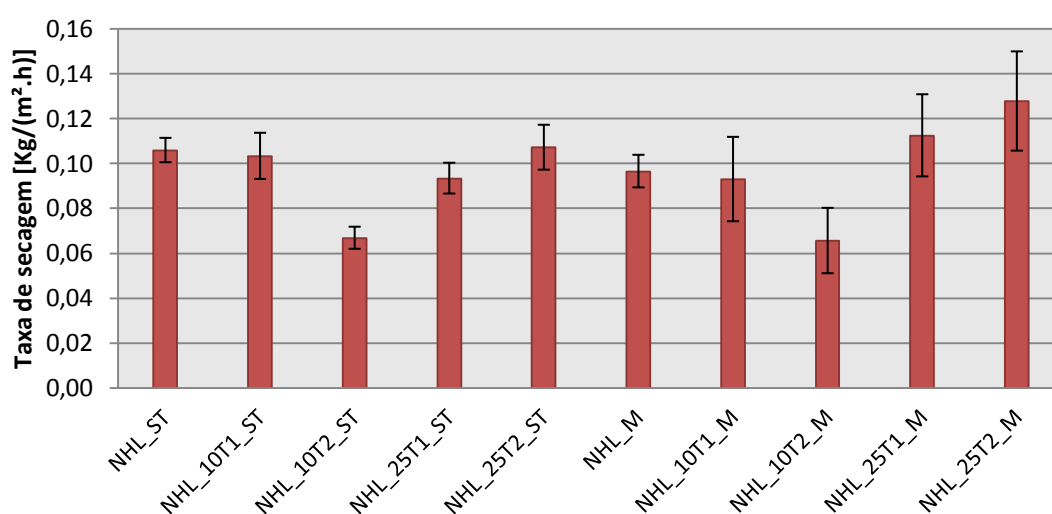


Figura 4.41 - Taxa de secagem aos 90 dias

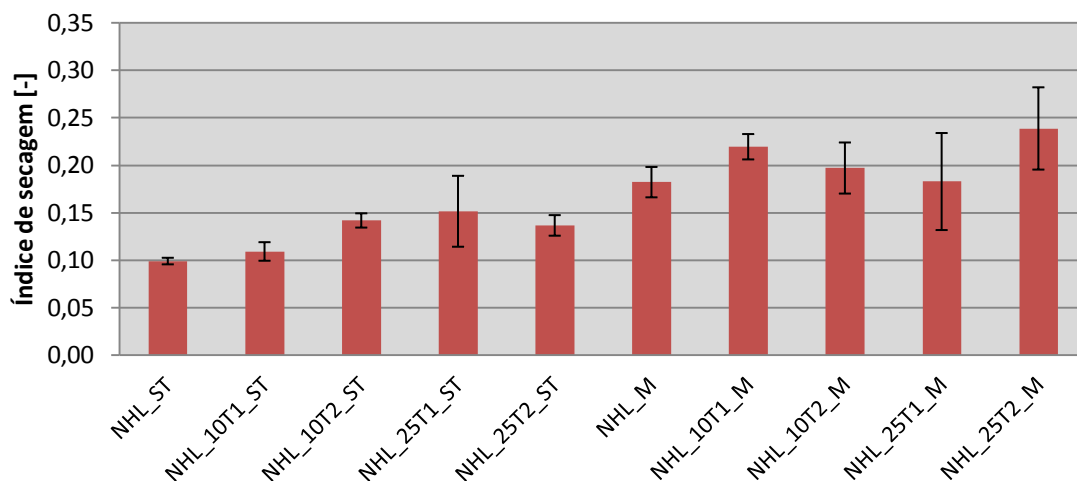


Figura 4.42- Índice de secagem aos 90 dias

Resultados aos 180 dias

Na Figura 4.43 e Figura 4.44 é apresentada a curva de secagem e as taxas de secagem referentes aos 180 dias. Da sua análise, verifica-se que todas as argamassas apresentam a valores bastante próximos.

Na cura ST é possível observa uma tendência decrescente da taxa de secagem entre as argamassa adicionadas, associada ao aumento da percentagem de resíduo adicionado; as composições com 10% de adição são aquelas que apresentam maiores taxas de secagem.

Analizando a cura M verifica-se uma tendência crescente das taxas de secagem, com o aumento da adição de resíduos cerâmicos; nessa cura as argamassa com 25% de resíduos na sua composição apresentam as maiores taxas de secagem.

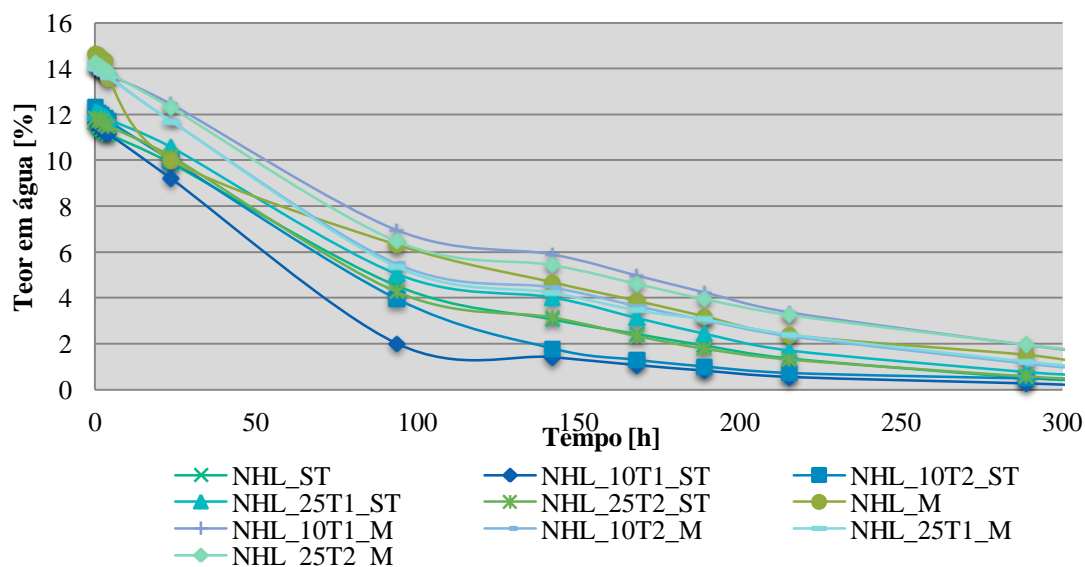


Figura 4.43 - Curvas de secagem aos 180 dias

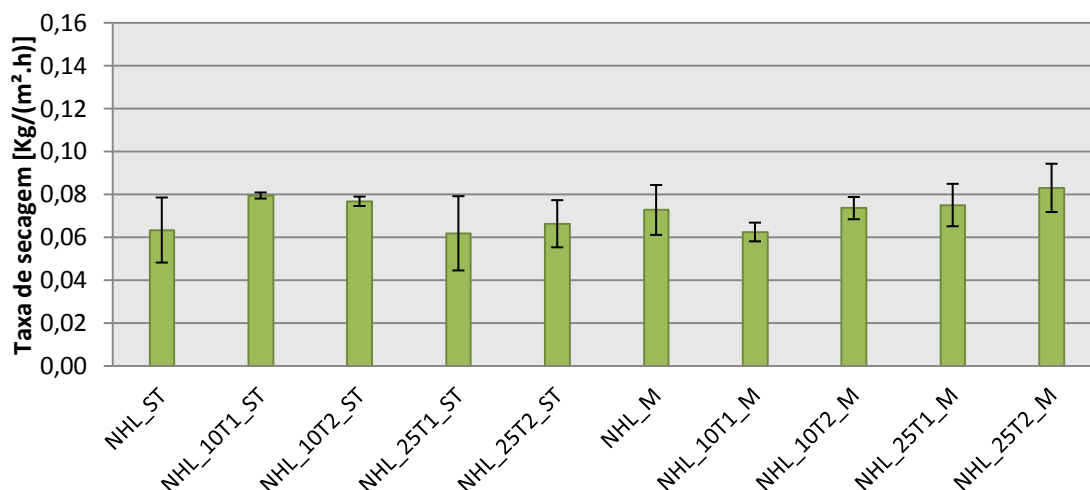


Figura 4.44 - Taxas de secagem aos 180 dias

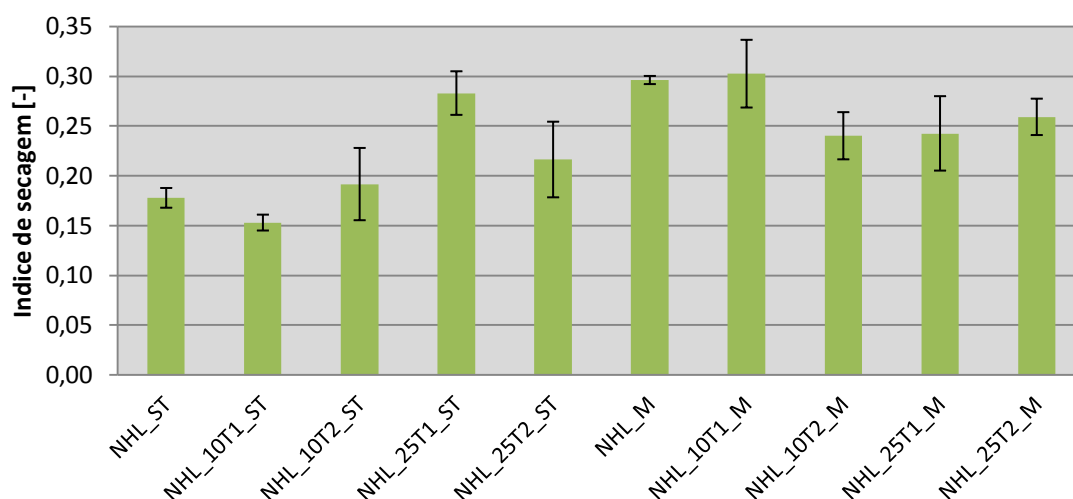


Figura 4.45 - Índice de secagem aos 180 dias

Evolução dos resultados

Na Figura 4.46 são apresentados os valores correspondentes à evolução da taxa de secagem e na Figura 4.47 são apresentados os valores do índice de secagem.

Analisando a Figura 4.46 constata-se uma tendência crescente da taxa de secagem em todos os provetes entre as idades dos 28 e 90 dias, com exceção da argamassa NHL_10T2 que em ambas as curas, apresenta uma redução de TS nesse período.

Aos 180 dias são registados os menores valores de TS, com exceção novamente da argamassa NHL_10T2 e NHL_25T2 ambas referentes à cura ST, que apresentam um ligeiro aumento relativamente aos 28 dias.

Quando analisadas as composições com adição de resíduo T1, verifica-se uma tendência decrescente da taxa de secagem, com o aumento da adição de resíduo nas argamassas sujeitas à cura ST; esta tendência é inversa na cura M.

No caso das argamassas contendo resíduos T2 não se verifica nenhuma tendência entre as variações da taxa de secagem e as percentagens de adição; de um modo geral registam-se menores taxas na cura M.

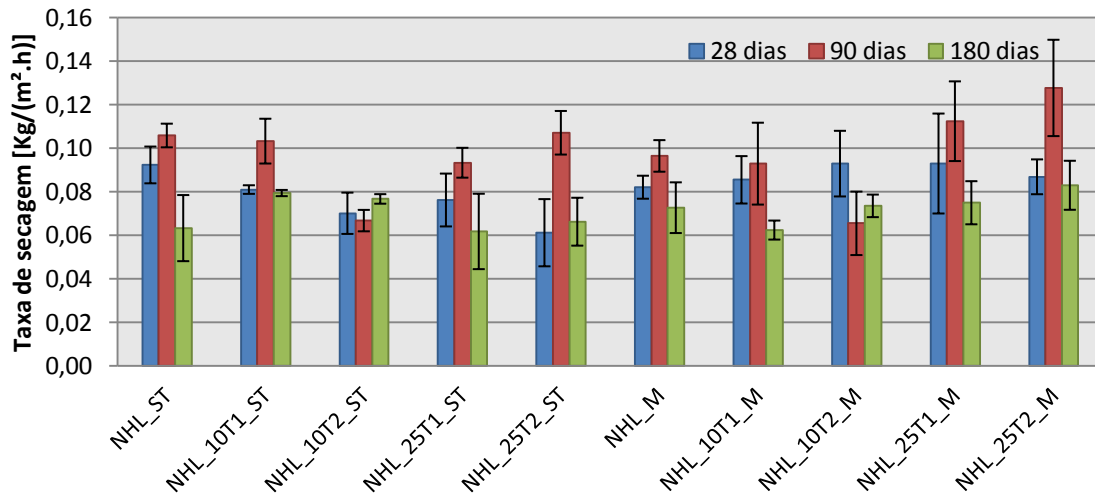


Figura 4.46 - Evolução da taxa de secagem

Analisando a Figura 4.47 verifica-se uma correlação entre os valores apresentados na Figura 4.46; observando-se uma perda de capacidade de secagem com o decorrer do tempo.

Nos provetes da cura ST dá-se uma diminuição do índice de secagem entre os 28 e 90 dias; no caso dos provetes de cura M, existe uma tendência crescente do índice de secagem em relação ao tempo de cura.

Resumindo a argamassa com maior velocidade de secagem é a NHL_25T2M; já a composição NHL_10T1_ST é a que apresenta maior capacidade de secagem.

Analisando aos 180 dias verifica-se que as argamassas com adições cerâmicas obtêm taxas de secagem superiores às das de referência.

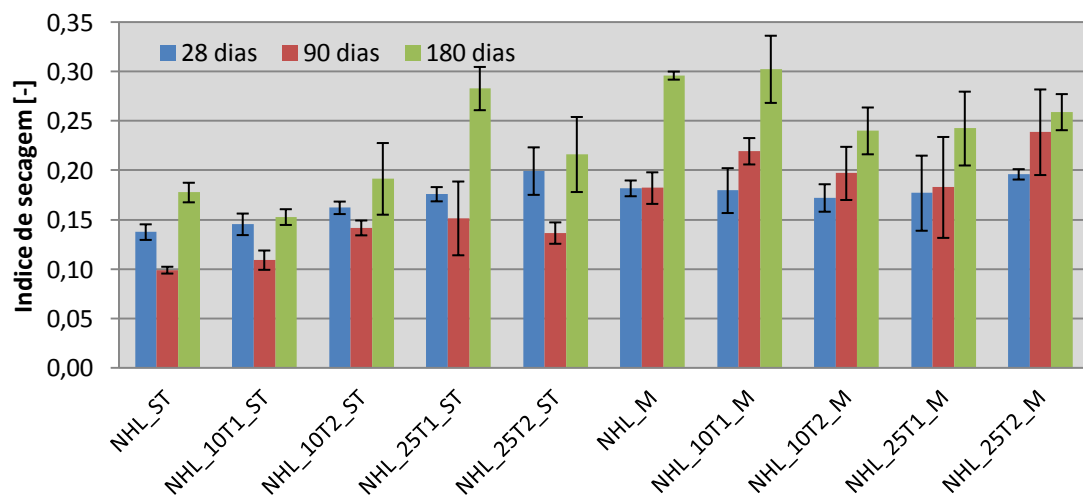


Figura 4.47 – Evolução do índice de secagem

4.2.6. Ensaio de porosidade aberta

Descrição do ensaio

O ensaio experimental consistiu na determinação da porosidade aberta através da absorção de água em vácuo, e da pesagem das amostras de provetes imersas. Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 1936 (IPQ, 2008).

Para este ensaio foram utilizadas as bases lisas e íntegras, do topo dos provetes resultante do ensaio de resistência à compressão; estes provetes foram mantidos numa estufa à temperatura de 60 °C durante mais de 24h. Cerca de 30min antes do ensaio, foram arrefecidos à temperatura ambiente.

Pesaram-se inicialmente os provetes numa balança de precisão 0,001g; após a pesagem, os provetes foram colocados num exsiccador e submetidos a uma subpressão criada através do acionamento de uma bomba de vácuo durante 24h, ligada ao exsiccador e própria para o efeito. Este processo tem como objetivo retirar todo o ar existente nos poros dos provetes. Findas as 24h foi introduzida água no exsiccador até que todos os provetes se encontrassem submersos, ficando assim sujeitos à subpressão criada pela bomba, mas imersos em água; desta forma pretendeu-se preencher com água os poros existentes nos provetes que estariam anteriormente preenchidos por ar. Passadas 24h desligou-se a bomba de vácuo e abriu-se o exsiccador deixando os provetes submersos à pressão ambiente.

Passadas 72h do início do ensaio os provetes foram retirados do exsiccador e pesados em imersão numa balança de precisão 0,001g, obtendo-se assim a massa hidrostática da amostra; em seguida os provetes repousaram-se por breves segundos sobre um pano molhado, retirando-se desta forma o excesso de água superficial, e pesados na mesma balança mas fora de água, de forma a obter a massa saturada das amostras.



Figura 4.48 - Ensaio de porosidade aberta

Com os valores obtidos nas pesagens foi possível determinar a massa volúmica aparente (MVap), bem como a percentagem de poros abertos (Pab) através Equação 4.11:

$$P_{ab} = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad [\%]$$

Equação 4.11

Onde;

P_{ab} : porosidade aberta [%];

m_s : massa da amostra seca [g];

m_d : massa hidrostática da amostra [g];

m_h : massa saturada da amostra [g].

A massa volúmica aparente MV_{ap} obteve-se através da seguinte expressão:

$$MV_{ap} = \frac{m}{V} = \frac{m_s}{m_h - m_d} \times 100 \quad [\%]$$

Equação 4.12

Onde;

MV_{ap} : massa volúmica aparente [Kg/m³];

m_s : massa da amostra seca [g];

m_d : massa hidrostática da amostra [g];

m_h : massa saturada da amostra [g].

Apresentação de Resultados

Figura 4.55 e Figura 4.56 encontram-se os resultados do ensaio de porosidade aberta e massa volúmica obtidos aos 28, 90 e 180 dias.

A porosidade aberta (p_{ab}) permite quantificar a percentagem de poros abertos (com ligação aos exterior) existentes numa argamassa. Este parâmetro permite inferir sobre a compactidade das argamassas. Deste modo, quanto menor o valor da porosidade aberta, mais compacta será a argamassa.

Resultados aos 28 dias

Analisando a Figura 4.49, verifica-se que as argamassas provenientes da cura ST, apresentam menor porosidade aberta que as sujeitas à cura M.

Na cura ST, verificam-se valores da porosidade aberta bastante semelhantes entre as composições, não sendo possível evidenciar nenhuma delas.

Na cura marítima (M), as argamassas com adições cerâmicas apresentam porosidades menores que as da argamassa de referência NHL; entre as argamassa adicionadas verifica-se

que as composições com T2 registam porosidades superiores às suas homólogas com adições T1.

Os resultados observados na Figura 4.50 coincidem com o que foi analisado anteriormente, verifica-se que as argamassas da cura ST apresentam uma maior massa volúmica, quando comparadas com as mesmas argamassas sujeitas à cura M.

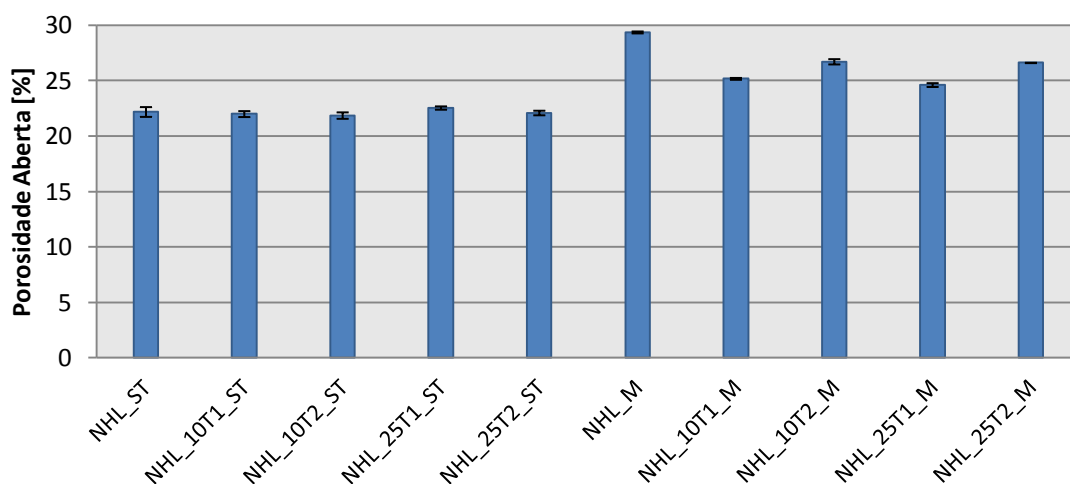


Figura 4.49 - Porosidade aberta aos 28 dias

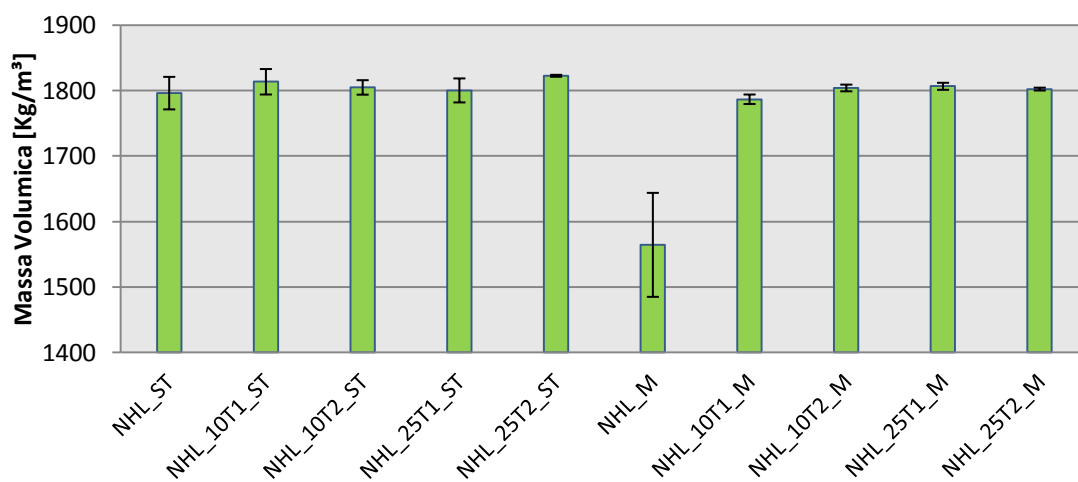


Figura 4.50 - Massa volúmica aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Analisando a Figura 4.51, verifica-se tal como registado aos 28 dias, uma porosidade aberta menor nas argamassas da cura ST; em termos gerais as argamassas com adições cerâmicas apresentam uma porosidade maior que as respetivas argamassas de referência em

ambas as curas; com exceção das argamassas NHL_25T1 e NHL_25T2 que registam as menores porosidades entre as composições da cura M.

Na cura ST, observa-se uma tendência crescente ligeira da porosidade aberta com o aumento das adições.

Na análise dos resultados da massa volúmica (Figura 4.52), verifica-se que as argamassas da cura ST apresentam as maiores massas, tal como seria de esperar pela análise da porosidade aberta; devem ser no entanto evidenciadas as argamassas NHL_25T1_M e NHL_25T2_M, que apresentam Mva bastante superiores aos obtidos pelas restantes composições da cura M.

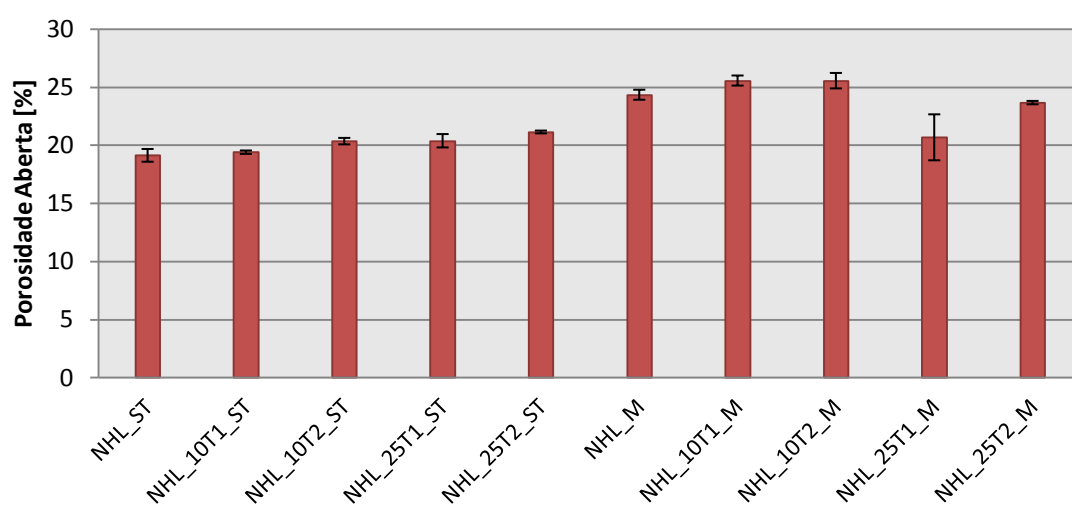


Figura 4.51 - Porosidade aberta aos 90 dias

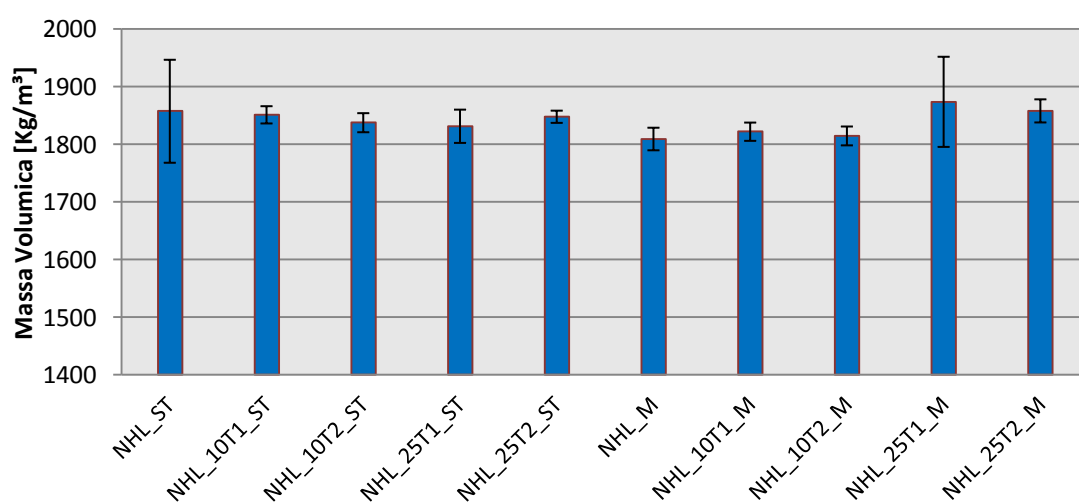


Figura 4.52 - Massa volúmica aos 90 dias

Resultados aos 180 dias Figura 4.53 e Figura 4.55 nota-se uma tendência para valores superiores de porosidade aberta nas argamassas sujeitas à cura M, tal como observado nas idades anteriores.

Na cura ST, as argamassas com adições cerâmicas apresentam valores de porosidade inferiores aos da argamassa NHL de referência; nas argamassas com adições T1, observa-se uma ligeira tendência decrescente da porosidade com o aumento das adições de resíduo.

Em relação à cura M, verifica-se que todas as argamassas com composições adicionais obtêm valores de porosidade aberta superiores aos registados pela argamassa de referência NHL. Na Figura 4.54, nota-se uma variação nos valores da massa volúmica nas argamassas provenientes da cura M, com valores de desvio padrão elevados o que revela uma heterogeneidade entre os provetes ensaiados.

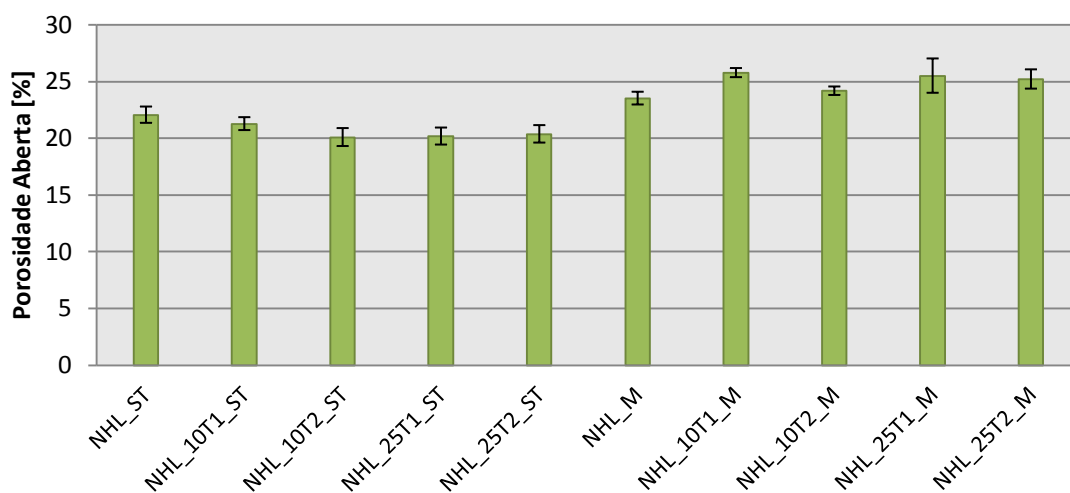


Figura 4.53 - Porosidade aberta aos 180 dias

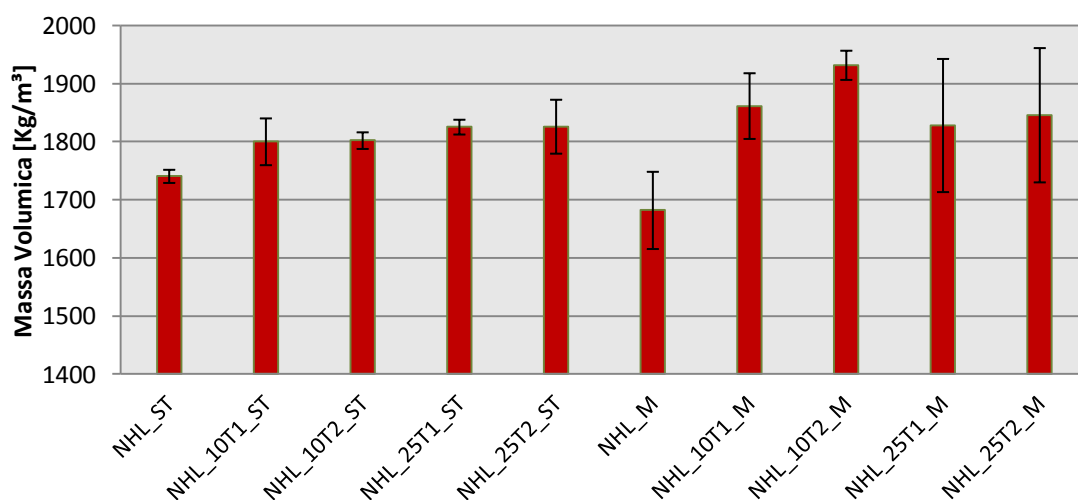


Figura 4.54 - Massa volúmica aos 180 dias

Evolução dos resultados

A porosidade aberta é inversamente proporcional à massa volúmica aparente; com o aumento de uma dá-se a diminuição da outra.

Figura 4.55 e Figura 4.56 verifica-se que as argamassas de cura M, apresentam valores superiores de porosidade aberta em todas as idades.

Na cura ST, observa-se uma homogeneidade dos valores da porosidade aberta nas diversas idades, verifica-se no entanto uma tendência decrescente da porosidade com o aumento da idade dos provetes, exceto no caso da argamassa de referência NHL, e da NHL_10T1.

Em relação à cura M, não existe uma tendência clara entre as argamassas; verificam-se contudo, valores maiores de porosidade aberta nas argamassas com 10% de adições cerâmicas, ainda assim próximos dos obtidos pelas adições de 25%.

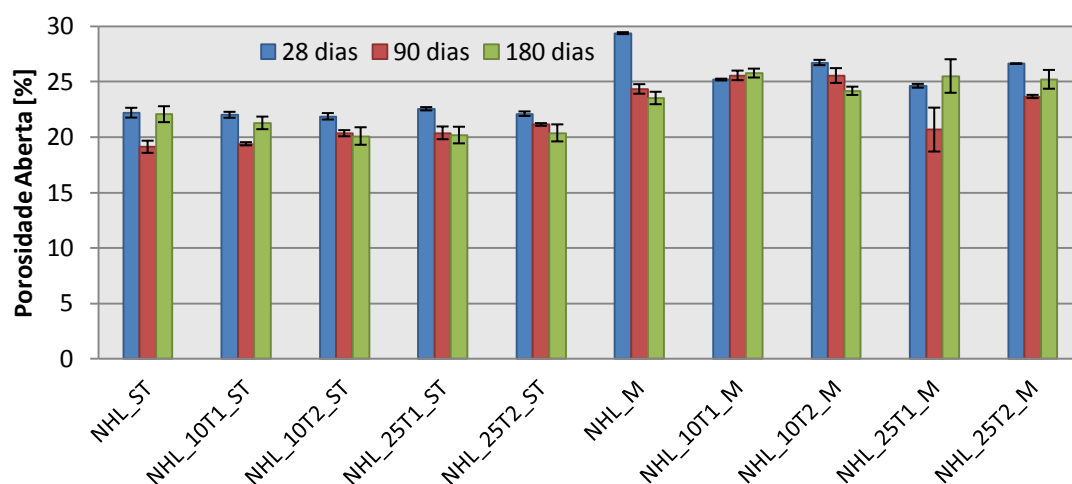


Figura 4.55 - Evolução da porosidade aberta

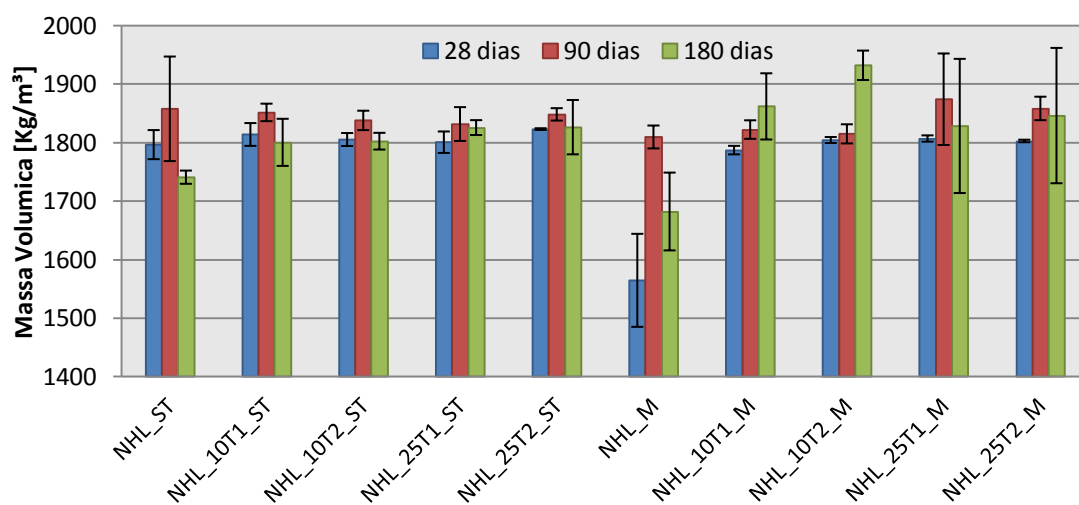


Figura 4.56 - Evolução da massa volúmica

4.2.7. Ensaio de resistência à ação dos sulfatos

Descrição do ensaio

O ensaio de resistência das argamassas ao ataque por sulfatos foi baseado na norma NP EN 12370 (IPQ, 2001), desenvolvida para ensaio de pedras naturais e ao especificado por Faria (Faria, 2009).

Inicialmente os provetes foram colocados numa estufa à temperatura de 105°C durante 24h, de modo a atingirem massa constante. Foi preparada uma solução de sulfato de sódio a 3,09%, o que corresponde a 32,9g de sulfato de sódio (Na_2SO_4) por cada litro de água a 20°C; esta solução foi utilizada várias vezes durante todos os ciclos do ensaio e corresponde a metade da concentração definida na norma.

O início de cada ciclo dá-se com a pesagem dos provetes numa balança de precisão 0,001g, depois de retirados da estufa e arrefecidos durante 30min à temperatura ambiente. Seguidamente os provetes são colocados dentro de uma caixa estanque com rede plástica no fundo, onde ficam mergulhados na solução de sulfato de sódio durante 2h, findas as quais são novamente colocados na estufa a 105°C durante 24h. Este processo (pesagem, imersão, secagem) decorreu durante 20 ciclos; cada ciclo é concluído com a pesagem do provete após secagem na estufa.

Aos 90 e 180 dias de cura, após a primeira emersão na solução de sulfatos, os provetes foram mantidos durante 72 horas na estufa, após as quais foram retirados e pesados nas mesmas condições descritas anteriormente e colocados novamente na estufa a 105°C. Passadas 24 horas os provetes são pesados, com o objetivo de verificar se a sua massa estabilizou (variação de massa inferior a 1% em 24 horas). No caso de não existir estabilização da massa dos provetes, são feitas pesagens de 24 em 24 horas até que se obtenha massa constante. Este procedimento foi efetuado apenas no primeiro ciclo; a fim de determinar a percentagem de sulfatos retida pelas argamassas.

Nos ciclos iniciais do ensaio de resistência aos sulfatos regista-se um aumento de massa dos provetes. Seguidamente observa-se a degradação destes através de sucessivas perdas de massa. Deste modo foram calculadas as variações de massa ao longo dos ciclos; para tal foi utilizada a Equação 4.13. obteve-se então a variação de massa de cada provete; foram depois calculados os valores médios para a variação de massa de cada três provetes, provenientes de cada cura. Foi ainda traçada graficamente a variação de massa por ciclo, de cada argamassa, permitindo verificar ganhos e perdas de massa ao longo do ensaio. Ao fim do 1º ciclo (aos 90 e 180 dias) obtém-se a percentagem de sulfatos retidos.



Figura 4.57 - Ensaio de resistência aos sulfatos

$$V.M = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

Equação 4.13

Onde:

V.M.: Variação de massa [%];

m_i : Massa do provete no ciclo i [g];

m_0 : Massa do provete no ciclo zero [g].

Apresentação de Resultados

As Figura 4.58, Figura 4.59 e Figura 4.61 registam a evolução do ensaio de resistência aos sulfatos das argamassas em estudo, aos 28, 90 e 180 dias respetivamente.

Resultados aos 28 dias

Na Figura 4.58 é possível observar a evolução do ensaio dos sulfatos aos 28 dias. Quando analisado o comportamento de resistência aos ciclos de ensaio, verifica-se que as argamassas provenientes da cura M apresentam perdas de massas superiores às das argamassas da cura ST. A NHL_25T2 é composição que apresenta maior perda de massa no final dos 20 ciclos de ensaio em ambas as cura ensaiadas; por outro lado as argamassas com maior resistência aos sulfatos foram as NHL, apresentando as menores perdas de massa no final do ensaio. Aos 28 dias as argamassas da cura ST apresentam perdas de mássicas médias na ordem dos 63%, enquanto as composições da cura M perdem em média 68% de massas.

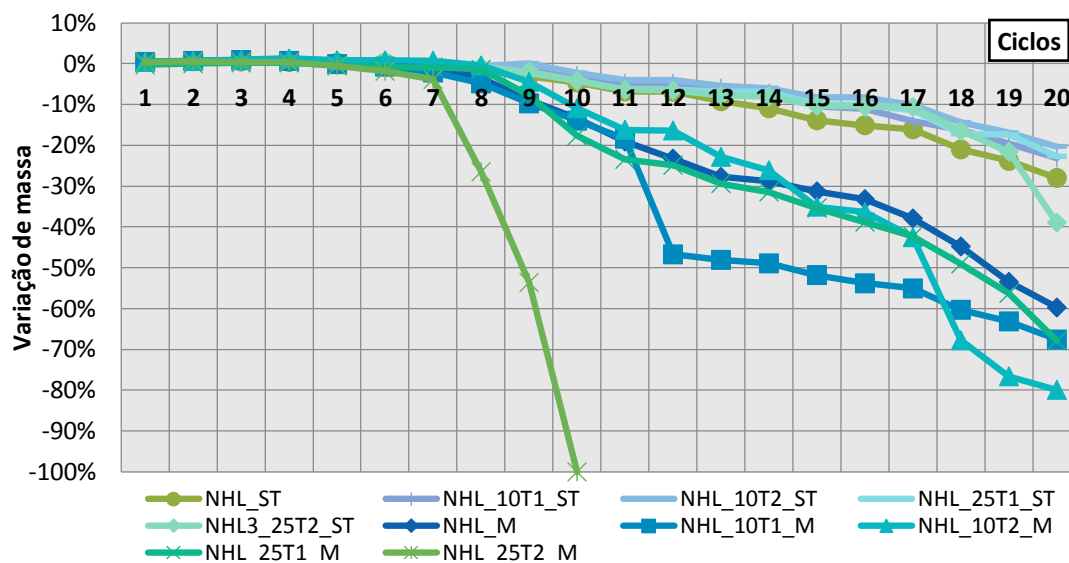


Figura 4.58- Resistência aos sulfatos aos 28 dias

Resultados aos 90 dias

Da análise da Figura 4.59 observa-se que aos 90 dias as argamassas da cura M perdem muito mais massa que as mesmas composições sujeitas à cura ST; já que em termos médios as argamassas da cura M perderam 78,5% de massa contra os 35,7% nas composições ST. A argamassa que apresenta maior resistência aos sulfatos aos 90 dias é a NHL_10T1, registrando menor perda de massa em ambas as curas ao fim dos 20 ciclos; por outro lado a argamassa NHL_25T2 sujeita à cura marítima, é aquela que apresenta menor resistência, perdendo a totalidade da sua massa antes do final do ensaio. É ainda possível verificar uma tendência crescente entre a percentagem de adição de resíduos e a perda de massa dos provetes.

Na Figura 4.60 encontram-se representados os valores referentes à retenção inicial de sulfatos. Verifica-se claramente que as composições da cura ST têm retenções superiores às da cura M. Na cura ST a percentagem de sulfatos retida pelas argamassas situa-se numa gama de valores entre os 0,3% e os 0,5%, e um valor médio de 0,4%. Na cura M os valores situam-se entre os 0,1% e os 0,5%, com um valor médio de 0,3%.

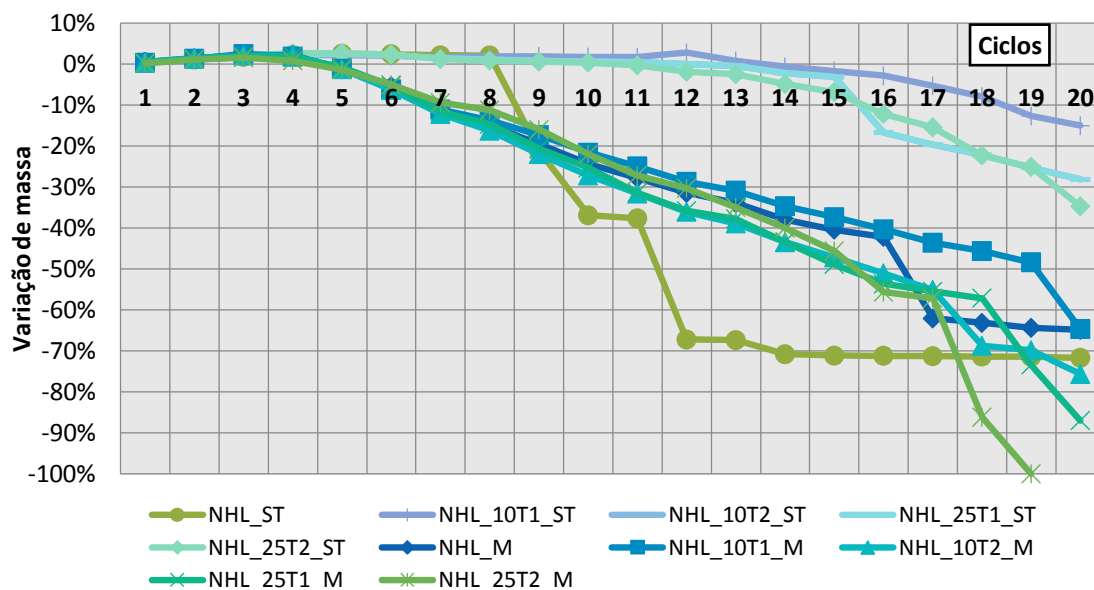


Figura 4.59 - Resistência aos Sulfatos aos 90 dias

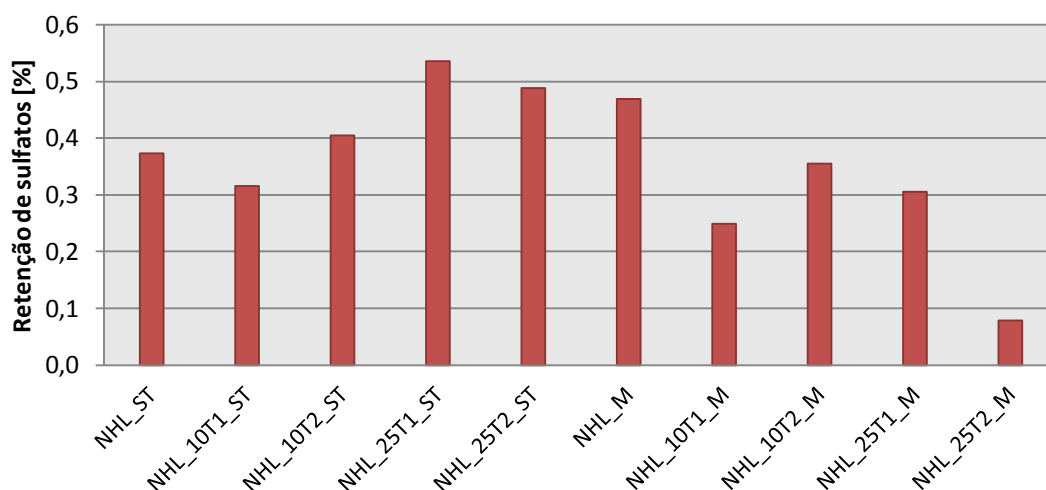


Figura 4.60 - Retenção inicial de sulfatos aos 90 dias

Resultados aos 180 dias

Na Figura 4.61 observam-se os resultados, obtidos aos 180 dias de cura; as argamassas de cura M, registam perdas de massa médias de 100%; nas argamassas sujeitas à cura ST as perdas médias de massa situam-se nos 26,3 %.

É a argamassa com melhor comportamento é, à semelhança do que se verificou aos 90 dias, a argamassa NHL_10T1 sujeita à cura ST; por outro lado a argamassa com perda de massa mais rápida foi a NHL_25T2.

Figura 4.62 verifica-se que as argamassas da cura ST, têm maior retenção inicial de sulfatos. Na cura ST os valores obtidos situam-se entre os 0,08% e 0,35%, com um valor médio de 0,19% de massa de sulfatos retida.

Na cura M, os valores de retenção de sulfatos encontram-se entre os 0% e 0,19%, com uma valor médio de 0,09% de massa de sulfatos retida.

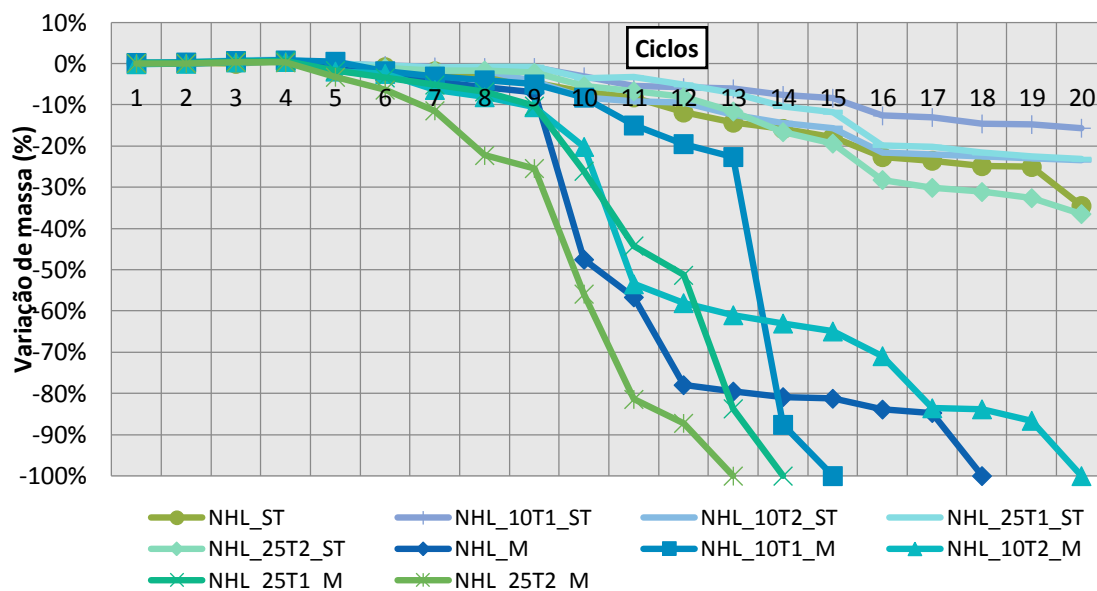


Figura 4.61 - Resistência aos Sulfatos aos 180 dias

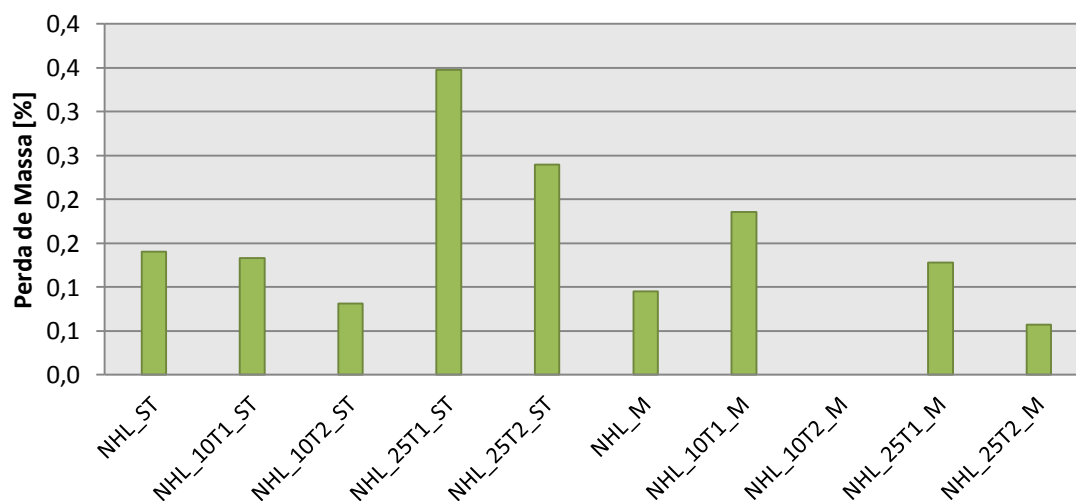


Figura 4.62 - Retenção inicial de sulfatos aos 180 dias

Evolução dos resultados

Na Figura 4.63 encontra-se apresentada a evolução em termos de perdas de massa, em todas as idades e curas das argamassas ensaiadas ao final de 20 ciclos de ensaio.

Verifica-se tal com observado anteriormente, que as argamassas sujeitas à cura M apresentam perdas de massa maiores em todas as idades, existindo uma tendência crescente entre a perda de massa e a idade dos provetes.

Na cura ST o comportamento é contrário, observando-se uma tendência decrescente em relação à perda de massa e a idade de cura dos provetes. Com exceção da idade de 28 dias, a argamassa NHL_10T1 é a que apresenta uma maior resistência à ação dos sulfatos; por outro lado a argamassa NHL_25T2, especialmente quando sujeita à cura M, é a que resiste menos ao ataque dos sulfatos. Na análise à retenção de sulfatos verifica-se claramente que as argamassas sujeitas à cura ST, têm retenções superiores às registadas pelas composições da cura M. Destaca-se a argamassa NHL_25T1_ST que apresenta em ambas as idades estudadas, a maior percentagem de massa de sulfatos retida.

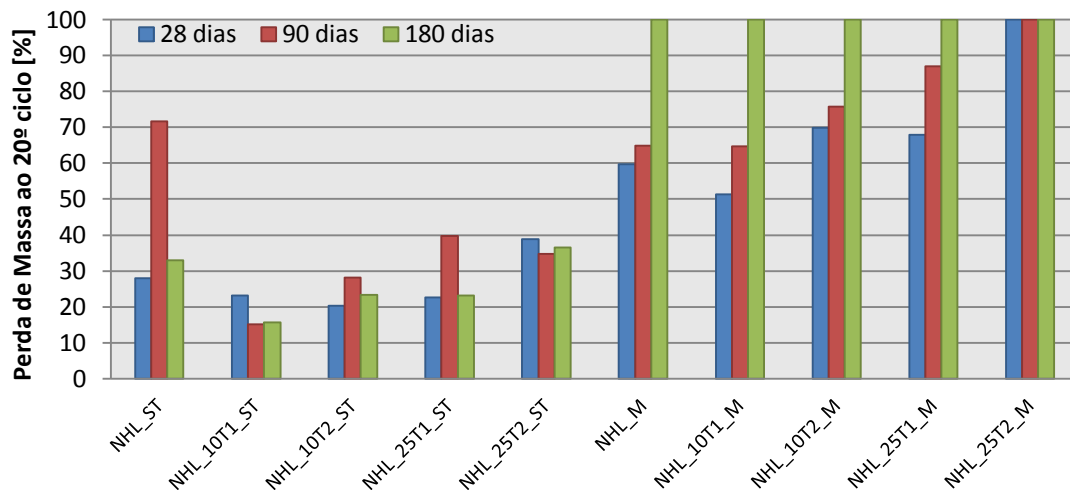


Figura 4.63 - Evolução da resistência aos sulfatos

4.3. Provetes em Tijolos

Nos provetes constituídos por argamassas aplicadas sobre tijolo, para além das curas ST e M condicionaram-se os provetes também na cura SP (nas condições ambiente da cura ST mas sem cura inicial húmida e com aspersão de água diária durante os primeiros dias).

4.3.1. Ensaio de condutibilidade térmica

Descrição do ensaio

A condutibilidade térmica (λ) é uma característica própria de cada material que traduz a forma como uma camada do material deixa-se atravessar pelo calor. Pode ser definida como a quantidade de calor que atravessa cada unidade de espessura do material, por cada unidade de área, por unidade de diferença de temperatura [W/m.°C] (Henriques, 2007).

O ensaio teve como base as normas de utilização do equipamento utilizado “ISOMET Model 2104” (Heat Transfer Analyser). Este ensaio foi efetuado para cada amassadura nas três curas existentes. De modo a garantir o menor teor em água possível, os tijolos provenientes da cura marítima foram colocados durante 24h na sala com a climatização da cura ST (à temperatura $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa $Hr = 65 \pm 5\%$).

Colocaram-se os tijolos sobre uma placa de XPS e foram efetuados seis registos em pontos equidistantes do tijolo, conforme apresentado Figura 4.64, de forma a cobrir a maior área possível, e a obter um valor médio representativo do valor de condutibilidade térmica, (λ) [W/m.K], de cada argamassa.

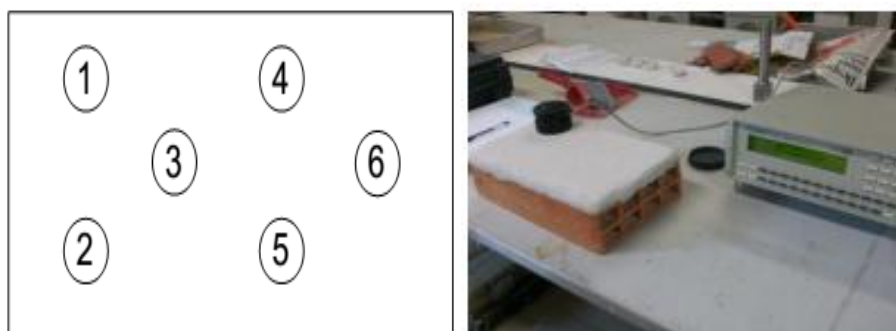


Figura 4.64 - Ensaio de condutibilidade térmica

Apresentação de Resultados

Figura 4.65 são apresentados os resultados referentes ao ensaio de condutibilidade térmica, em todas as idades e curas.

Verifica-se que em todas as curas, as argamassas com adições cerâmicas apresentam uma condutibilidade menor do que as respetivas argamassas de referência, mas com a evolução do tempo de cura, estas diferenças esbatem-se, de tal modo, que aos 180 dias todas as argamassas apresentam valores de condutibilidade (λ) bastante semelhantes entre si.

Ainda assim observa-se que as argamassas provenientes da cura SP apresentam condutibilidades ligeiramente inferiores quando comparadas às composições das restantes curas.

As argamassas com adições cerâmicas apresentam nas curas ST e SP uma tendência decrescente da condutibilidade térmica face ao aumento da percentagem de adição; já na cura M, verifica-se uma tendência inversa.

Quando analisadas entre si as argamassas T1 e T2 apresentam valores bastante similares em todas as idades.

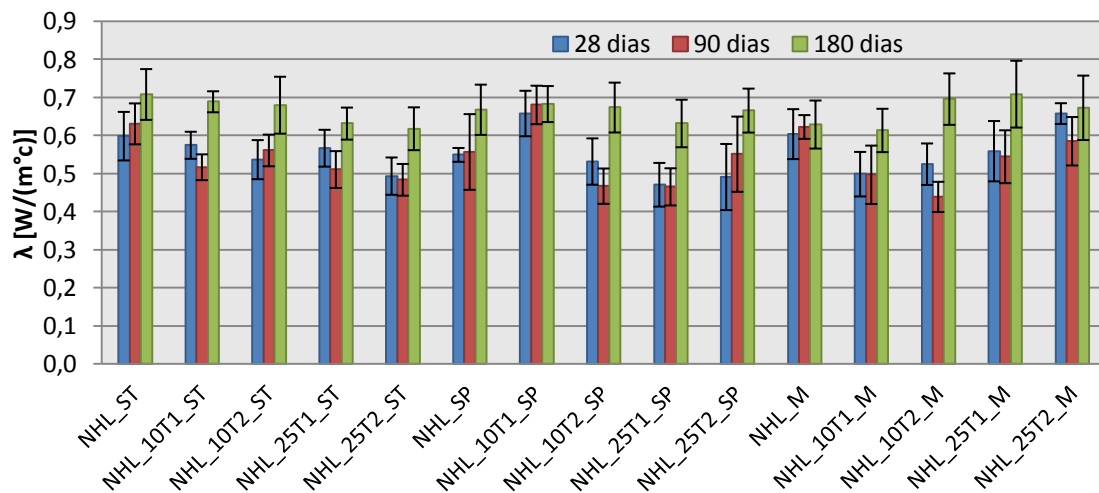


Figura 4.65 - Resultados da condutibilidade Térmica

4.3.2. Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons

Descrição do ensaio

Após a realização do ensaio de condutibilidade térmica, e tendo como base a ficha de ensaio LNEC FE Pa 43 (LNEC, 2010), efetuou-se o ensaio de propagação de ultrassons com o objetivo de determinar a compacidade das argamassas.

O ensaio realizou-se com o auxílio de uma máquina de propagação de ultrassons que automaticamente regista a velocidade de propagação entre os sensores/ emissor e recetor.

Para a realização do ensaio foram marcados a lápis seis pontos equidistantes na superfície da argamassa, de forma a homogeneizar os resultados obtidos. Os pontos foram designados de A a F, e realizaram-se as medições. Inicialmente colocou-se o emissor no ponto A e o recetor no ponto B; mantendo os transdutores na mesma posição efetuaram-se três medições. Seguidamente e mantendo o emissor no ponto A, deslocou-se o recetor para o ponto C, e repetiu-se o processo do ponto anterior. Repetiu-se o processo até o recetor chegar ao ponto F, e, após as medições, deslocou-se o emissor para o ponto B, mantendo o recetor em F, e reini-

ciou-se o processo. O ensaio termina quando se realizam as medições com o emissor na posição D e o recetor na posição F.

Os valores obtidos pela máquina são em tempo; conhecendo a distância entre os pontos de aplicação do emissor e recetor foram obtidas as velocidades de atravessamento em m/s.



Figura 4.66 - Preparação e realização do ensaio de ultrassons

Apresentação de Resultados

A velocidade de propagação dos ultrassons permite inferir sobre o grau de compactidade das argamassas, traduzindo-se por valores superiores na propagação dos ultrassons, em argamassas com maior compactidade.

Este ensaio foi realizado de forma a avaliar a homogeneidade e compactidade do material em estudo. Na Figura 4.67 encontram-se representados os resultados obtidos no ensaio de propagação de ultrassons em todas as idades e curas ensaiadas.

Em todas as argamassas verificou-se uma redução sucessiva da velocidade de propagação dos ultrassons, com o aumento do tempo de cura, indiciando uma menor compactidade do material. Os provetes sujeitos à cura SP apresentam os maiores valores de propagação de sons quando comparados com as restantes curas.

Analisando os provetes com adição cerâmica T1 verifica-se que em todas as curas e idades, estes obtêm valores inferiores aos das argamassas de referência; quanto à percentagem de adição não se observa nenhuma tendência clara, uma vez que os valores obtidos encontram-se dentro da mesma gama.

As argamassas com adições de T2 nas suas composições, apresentam, tal como as com adições T1, valores em todas as idades e curas inferiores aos das argamassas de referência NHL. Quando comparadas entres si, as argamassas com adições T1 e T2 apresentam valores bastante próximos, não sendo possível verificar uma tendência clara.

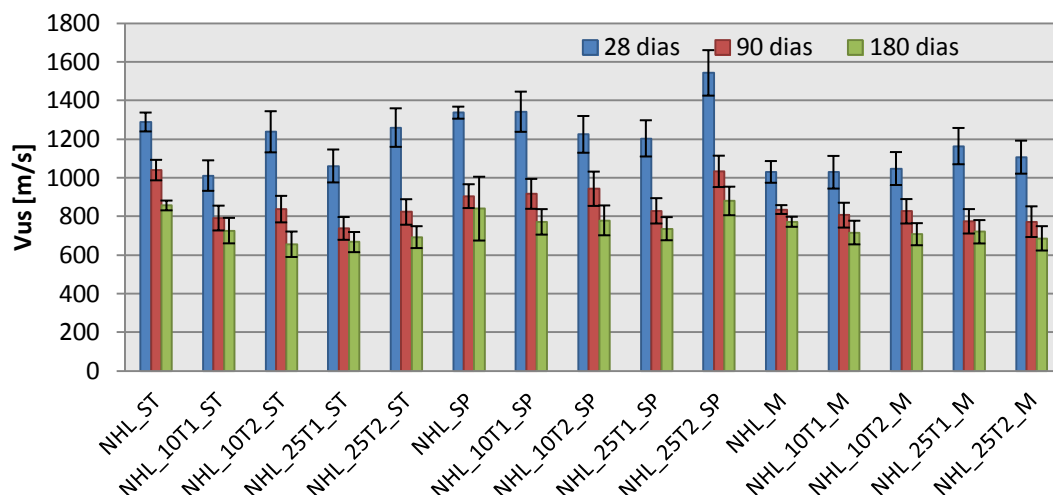


Figura 4.67 - Velocidade de Propagação dos Ultrassons

4.3.3. Ensaio de absorção de água a baixa pressão (tubos de Karsten)

Descrição do ensaio

O ensaio dos tubos de Karsten tem como objetivo avaliar a capacidade que as argamassas têm de absorver água. Para isso é contabilizado o volume de água absorvido numa determinada secção e durante um período de tempo pré definido.

Este ensaio consistiu na colocação de três tubos de Karsten na superfície da argamassa, com os tijolos dispostos na vertical.



Figura 4.68 - Ensaio de absorção de água (tubos de Karsten)

Foram determinados os diâmetros interiores dos tubos, e estes foram aplicados contra a argamassa e fixados com auxílio de anéis de plasticina criados à medida da boca dos tubos e aplicados na sua abertura, de modo a garantir a estanquidade do sistema mas tendo o cuidado de não obstruir a zona de contacto com a argamassa.

No início do ensaio encheram-se os tubos de água até à marca 0,0 cm³, o que equivale a um volume de água de 4 cm³. Em seguida foi medido o volume de água nos tubos aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos contabilizados a partir do momento em que foi colocada água no tubo até à marca dos 0,0 cm³. Foram também registados os momentos em que foi necessário efetuar reposições de água; estas reposições realizaram-se sempre que no tubo a marca atingiu 4cm³ sendo a reposição feita até à marca 0,0 cm³.

Com os valores obtidos foi determinado o coeficiente de absorção de água, que traduz a quantidade de água absorvida numa determinada área durante um determinado período de tempo; O coeficiente corresponde basicamente ao declive de um segmento de reta entre o momento inicial do ensaio e a quantidade de água absorvida no momento de cálculo, sendo que um maior coeficiente corresponderá a uma absorção mais rápida; posteriormente foi feita uma média aritmética do coeficiente obtido entre os três tubos por argamassa.

$$C_{ab} = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \sqrt{t}\right)}$$

Equação 4.14

Onde;

C_{ab} : coeficiente de absorção de água [Kg/(m².t^{0.5})];

X: quantidade de água absorvida [ml];

d : diâmetro do tubo [mm];

t: duração da leitura [minutos].

Apresentação de Resultados

Nas Figura 4.69, Figura 4.70 e Figura 4.71 apresentam-se as curvas médias de evolução a absorção de água para cada argamassa de cada cura, às idades de 28, 90 e 180 dias.

Resultados aos 28 dias

Da análise da Figura 4.69 destaca-se a NHL_25T1_ST que absorve a maior quantidade de água (cerca de 94,85 ml de água) e cuja absorção inicial decorreu mais rapidamente. Por outro lado a NHL_10T1_ST é a que absorveu menos água.

Em termos médios as argamassas da cura M são as que absorvem menos água aos 28 dias; por outro lado as argamassas da cura ST são as que absorvem mais em valores médios.

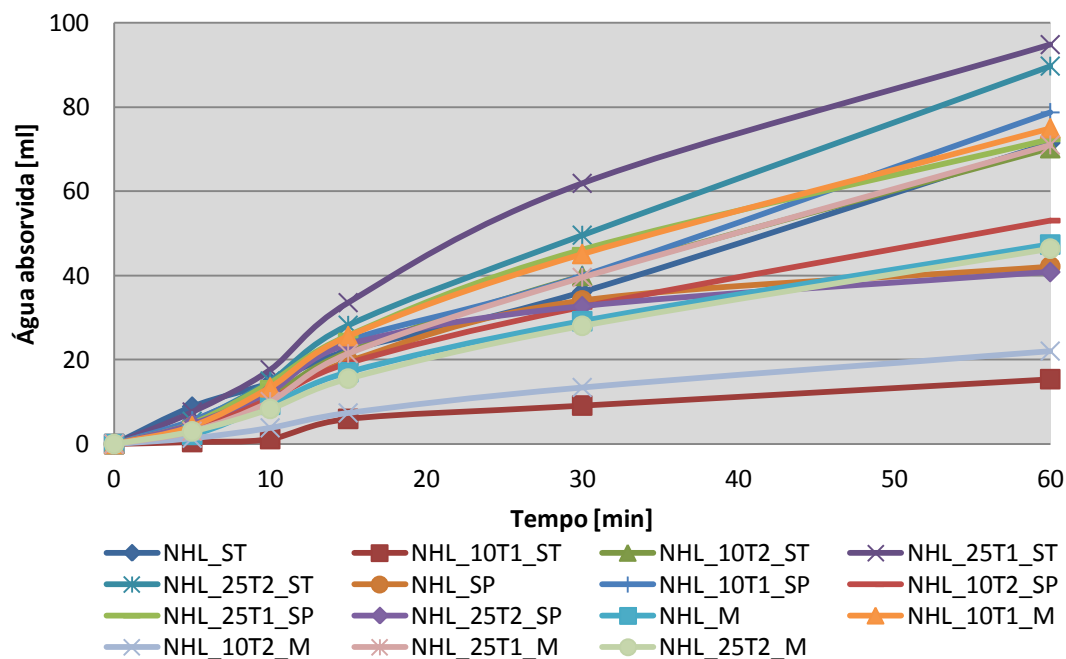


Figura 4.69 - Curvas de absorção de água a baixa pressão, 28 dias

Resultados aos 90 dias

Analisando a Figura 4.70 a argamassa NHL_10T1_ST é a que regista menor quantidade de água absorvida (cerca de 40,95ml). Por outro lado destaca-se a argamassa NHL_25T2_ST, que absorveu cerca de 112 ml de água ao fim de 60 minutos.

Aos 90 dias, as composições da cura M são as que em média absorvem menos água, (cerca de 52,3ml); na cura ST regista-se novamente uma absorção média maior que nas restantes curas (72,2ml).

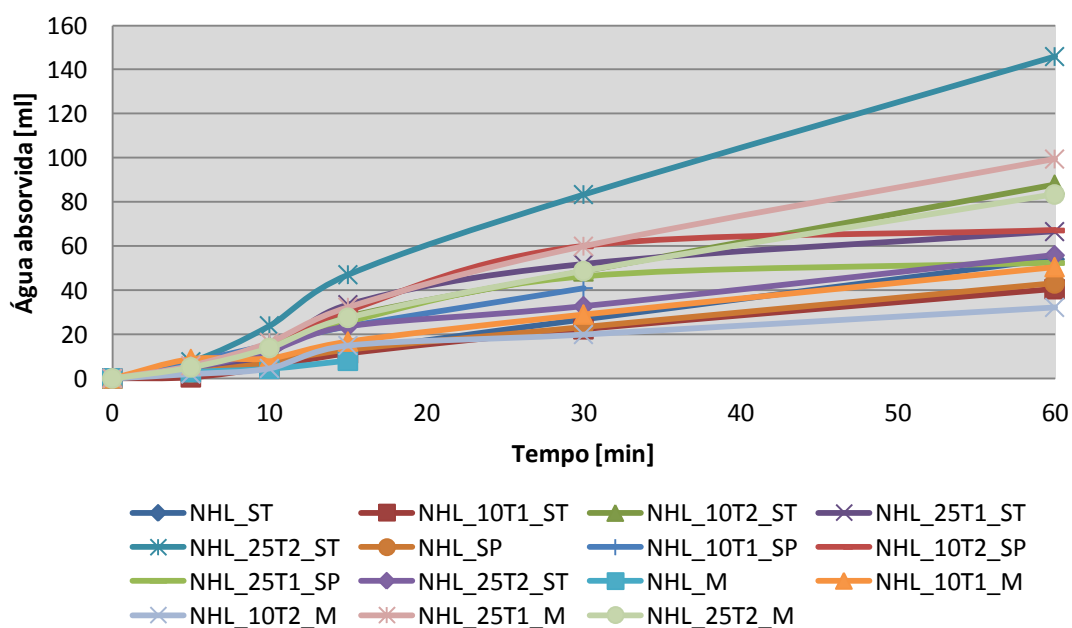


Figura 4.70 - Curvas de absorção de água a baixa pressão, 90 dias

Resultados aos 180 dias

Aos 180 dias de cura (Figura 4.71) a argamassa NHL_25T2_ST absorveu a menor quantidade de água (cerca de 50,1ml), no extremo oposto, a argamassa NHL_25T2_ST registou uma absorção média de 104ml de água.

Em relação às curas, aos 180 dias verifica-se que a cura SP apresenta em média a menor quantidade de água absorvida; nas curas M e ST obtêm-se valores médios muito próximos (cerca de 80 ml), nas duas curas.

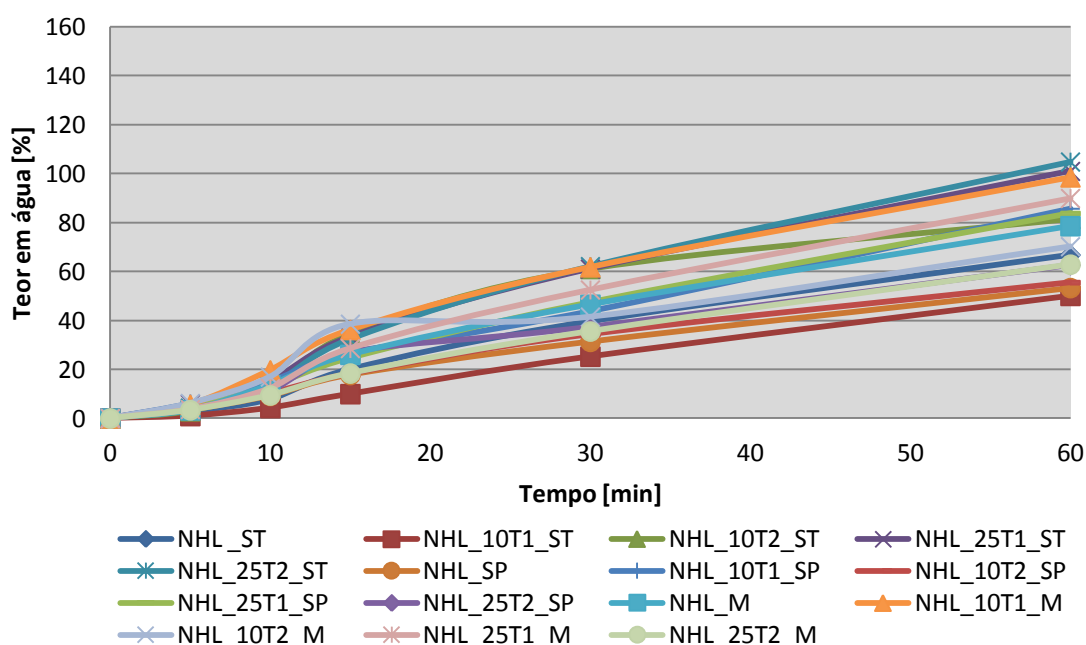


Figura 4.71 - Curvas de absorção de água a baixa pressão, 180 dias

Evolução de resultados

Analisando globalmente a Figura 4.72 e Figura 4.73, verifica-se que os provetes em suporte de tijolo sujeitos à cura SP e M, apresentam aos 60 minutos menores quantidades de água absorvida em todas as idades. Em termos gerais observa-se um aumento da quantidade de água absorvida e, subsequentemente do coeficiente de capilaridade com o aumento do tempo de cura. As argamassas com adições cerâmicas apresentam coeficientes superiores aos registados pelas respetivas argamassas de referência NHL.

Entre as composições com adições verifica-se que aquelas com adições de 10%, são as que absorvem a menor quantidade de água.

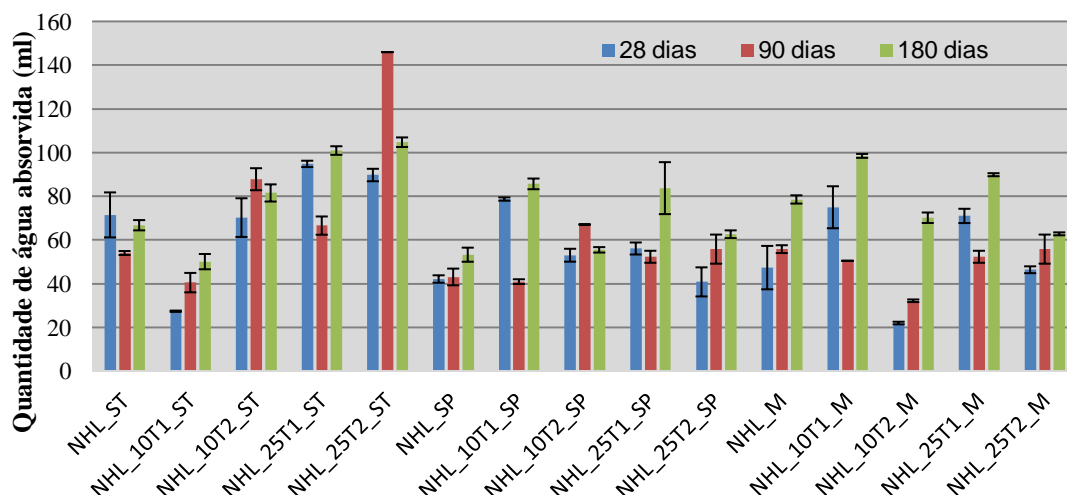


Figura 4.72 - Evolução da quantidade de água absorvida aos 60 minutos

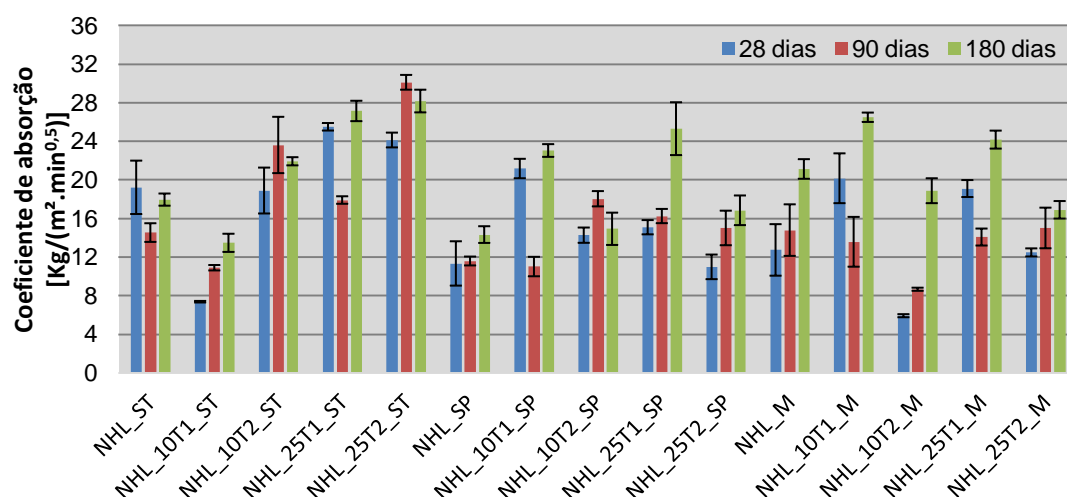


Figura 4.73 - Evolução do coeficiente de absorção aos 60 minutos

4.4. Estação de envelhecimento natural de rebocos

Introdução

No âmbito dos projetos financiados pela METACAL e LIMECONTECH, foi executada uma Estação de Exposição Natural de Revestimentos, a poente do edifício IX do Campus da FCT UNL (EENR), com o objetivo de caracterizar o comportamento das argamassas sob a forma de reboco, em exposição natural e ao longo do tempo.

A utilização da EENR tem como principal objetivo recriar a evolução das argamassas em rebocos quando sujeitas a exposição climática real e a uma escala semelhante à verificada na aplicação real de revestimentos.

Para tal foram construídos muretes de alvenaria de um pano de tijolo de 22 cm, colocado ao cutelo com espessura de 20cm, de modo a recriar alvenaria corrente, onde foram aplicados diretamente rebocos constituídos por chapisco e camada de base com as diferentes argamassas. A execução desta EENR decorreu em paralelo com a execução das dissertações do, mas ainda de Valério (Valério, 2013) e de Vargas (Vargas, 2013), tendo todos os trabalhos in situ sido coordenados pelo Eng.Vitor Silva, bolseiro da Secção de Construção e Hidráulica da FCT UNL.

Planeamento

Para a implementação da EENR foi feito um levantamento topográfico com recurso ao programa informático (Autocad 2013). Organizou-se a disposição dos muretes de modo a garantir a otimização do espaço e distâncias entre muretes que garantissem semelhante exposição solar. Os muretes são dispostos no eixo este-oeste para que as faces de aplicação se encontrem orientadas a norte e a sul. As dimensões dos muretes são 2,5 m x 2,0 m de alvenaria, assente diretamente sobre sapatas de betão com 2,5 m x 0,5 m e altura de cerca de 0,25m, para evitar o contacto entre a alvenaria e o terreno.

Execução

Apos a desmatização do terreno. Começou-se por fazer as marcações das sapatas com recurso a cangalho de forma a garantir o alinhamento e afastamento das mesmas. Foram construídas manualmente cofragens tradicionais, para a implementação das sapatas de suporte. Seguidamente procedeu-se ao nivelamento do terreno para colocação das cofragens. Com o auxílio de uma betoneira de tremonha, foi fabricado no local betão para as fundações com o traço volumétrico de 1:4:3, de cimento, areia e brita graduada para o efeito. A recolha e colocação do betão nas sapatas foi executada através de carrinho de mão, sendo depois o betão vibrado manualmente.



Figura 4.74 - Alinhamento das cofragens de sapatas



Figura 4.75 - Colocação de Betão em sapatas

Após 48h foram retiradas as cofragens das sapatas, e iniciou-se o assentamento das alvenarias, de tijolo furado de 22 cm.

Para o assentamento da alvenaria foi fabricada no local, com auxílio da betoneira, uma argamassa, de traço volumétrico 1:4 de cimento e areia corrente. Sobre o topo dos muretes foi executado um capeamento, através da colocação de uma fiada de telhas marselha, garantindo uma maior impermeabilização dos topos.



Figura 4.76 - Produção de argamassa e assentamento de alvenaria



Figura 4.77 - Parque de muretes

Aplicação dos rebocos de argamassa

A aplicação dos rebocos de argamassa fez-se sobre um dos muretes construídos (Figura 4.78). Cada face do murete (orientada a Sul e a Norte) foi dividido em quatro áreas (painéis), através das pregagens de ripas de madeira com 2cm de lado e 2cm de espessura, de forma a garantir uma aplicação uniforme das argamassas e a rentabilizar a área de aplicação. Apenas se procedeu à aplicação dos rebocos de argamassas com adições de resíduos (Figura 4.79) e não da argamassa sem resíduo. Esta, por se tratar de um traço fraco em ligante (1:4) e pela mistura de areia utilizada também ter baixo teor de partículas de menores dimensões, não se revelou adequada para aplicação.

Em cada área de cada orientação foi aplicada uma composição diferente, sendo o reboco constituído por duas camadas de argamassa, chapisco e camada de base



Figura 4.78 - Organização dos muretes

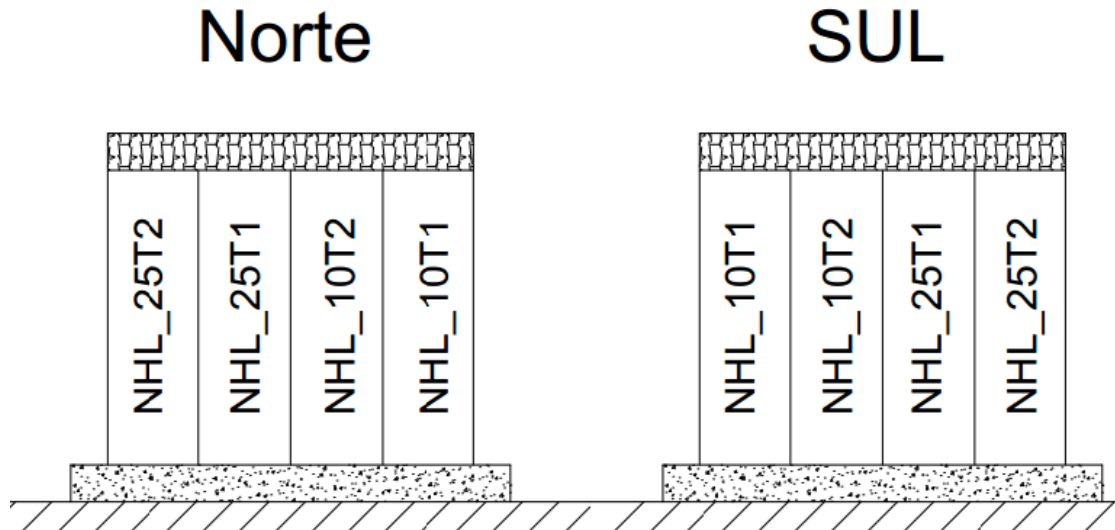


Figura 4.79 - Organização de argamassas no murete.

Em primeiro lugar criou-se uma camada de chapisco, executada sobre a alvenaria previamente humedecida; a aplicação foi feita com a colher de pedreiro, arremessando a massa com golpes rápidos e precisos, cobrindo a totalidade da superfície de forma não uniforme, e criando uma camada áspera de argamassa com cerca de 1cm, facilitando desta forma a aplicação da camada seguinte.

Após 24 horas, foi aplicada uma camada de base ou de regularização. Este processo foi efetuado cuidadosamente, comprimindo a argamassa com a colher de pedreiro sobre a camada anterior, e alisando a superfície com a talocha, criando deste modo uma superfície lisa e regular.

A realização dos rebocos decorreu nos dias 13 e 14 de novembro de 2013. Como o chapisco é sempre constituído por argamassa mais fluida, foi necessário adicionar 10% de água a essas argamassas, pelo que relativamente ao Quadro 3.3 apenas a quantidade de água passou para 1045ml, Quadro 3.3. A camada de reboco foi executada com a mesma quantidade de água utilizada na produção dos provetes estudados (Quadro 3.3 do capítulo 3)



Figura 4.80 - Preparação de argamassa para aplicação



Figura 4.81 - Aplicação do chapisco



Figura 4.82 - Aplicação de reboco sobre a camada de chapisco



Figura 4.83 - Aspeto final do murete rebocado

Apresentação de Resultados

Através da observação visual dos rebocos, ao fim de uma semana de aplicação, não foi observado nenhum fenómeno de retração com fissuração ou fendilhação visível a olho nu. Tal como seria de esperar, é notória a diferença cromática entre cada composição; verifica-se uma coloração avermelhada nas argamassas (com adições); essa coloração torna-se mais presente

com o aumento da percentagem de resíduos e não se distingue entre os dois tipos de resíduos. A coloração avermelhada é, no entanto, pouco visível.

Um aspeto importante, registado durante a aplicação das argamassas, foi o da falta de adesão ao suporte e de coesão entre partículas que todas as argamassas apresentaram. Apesar de se verificar uma melhoria no comportamento com o aumento da percentagem de adição, nenhuma destas argamassas apresenta condições fáceis para ser aplicada em obra. Tal situação deve-se maioritariamente à mistura de areias utilizada; para que tal não se suceda devesse ser feita uma escolha apropriada das areias a utilizar, de modo a garantir uma maior trabalhabilidade destas composições.

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se quadros que compilam todos os resultados quantificados obtidos, analisam-se comparativamente esses resultados entre si para as argamassas analisadas e procede-se ainda a comparação com resultados obtidos noutros estudos.

Quadro 5.1 - Síntese dos resultados – Argamassas no estado fresco

Ensaio	Cura	Estado Fresco				
	Argamassa	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2
Espalhamento (mm)	Média	162,5	162,5	161,5	163,3	159,3
Teor em ar [%]	Média	2,4	3,0	3,4	3,6	3,5
Retenção de água (%)	Média	83,3	84,5	87,2	86,8	73,8
Massa volúmica (Kg/dm ³)	Média	2021	2004	1993	2008	2019

Quadro 5.2 - Síntese dos resultados de caracterização mecânica - Argamassas no estado endurecido em provetes prismáticos

Ensaio	Idade	Cura	Standard					Marítima				
		Argamassa	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2
Edin [Mpa]	28 d	Média	2407	2635	2655	2441	2134	2044	2143	2222	2347	2566
		Dp	102	57	131	49	37	28	67	13	62	135
	90 d	Média	2462	2525	2418	2598	2592	2172	2688	2278	2153	2622
		Dp	93	48	247	77	48	35	97	66	62	33
	180 d	Média	2181	2775	2676	2419	2758	1941	2280	1869	2047	-
		Dp	114	154	8	131	167	9	55	86	65	-
Rt [Mpa]	28 d	Média	0,24	0,27	0,27	0,28	0,31	0,19	0,24	0,23	0,25	0,24
		Dp	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03
	90 d	Média	0,25	0,24	0,26	0,26	0,28	0,24	0,31	0,31	0,26	0,29
		Dp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	180 d	Média	0,19	0,27	0,27	0,23	0,28	0,24	0,26	0,19	0,22	0,19
		Dp	0,04	0,02	0,05	0,03	0,05	0,00	0,03	0,02	0,02	0,04
Rc [Mpa]	28 d	Média	0,30	0,50	0,52	0,43	0,52	0,35	0,40	0,48	0,47	0,55
		Dp	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01
	90 d	Média	0,45	0,49	0,48	0,47	0,56	0,59	0,71	0,66	0,52	0,78
		Dp	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,06
	180 d	Média	0,35	0,42	0,41	0,39	0,46	0,42	0,43	0,40	0,47	0,44
		Dp	0,05	0,06	0,08	0,07	0,02	0,09	0,02	0,11	0,06	0,03

Edin-Modulo de elasticidade dinâmico; Rt- Resistência à tração por flexão;

RC- Resistência à compressão

Quadro 5.3 - Síntese dos resultados de caracterização face à água - Argamassas no estado endurecido em provetes prismáticos

Ensaio	Idade	Cura	Standard					Marítima				
		Argamassa	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2
VA [Kg/m ²]	28 d	Média	17,50	18,12	16,99	18,43	18,05	20,89	20,89	20,31	21,63	22,50
		Dp	0,58	0,77	0,33	0,60	0,22	0,62	0,47	0,47	0,30	0,77
	90 d	Média	16,57	16,81	16,60	16,95	17,46	20,41	20,50	21,19	21,96	19,17
		Dp	0,51	0,44	0,50	0,35	0,31	0,87	0,92	0,46	1,63	1,47
	180 d	Média	17,63	16,77	15,42	18,09	17,20	21,21	20,27	20,20	20,05	20,39
		Dp	2,14	0,80	3,06	0,77	1,18	3,04	1,09	0,61	1,28	2,72
IS [-]	28 d	Média	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,18	0,18	0,17	0,18	0,20
		Dp	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01
	90 d	Média	0,10	0,11	0,14	0,15	0,14	0,18	0,22	0,20	0,18	0,24
		Dp	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,05	0,04
	180 d	Média	0,18	0,15	0,19	0,28	0,22	0,30	0,30	0,24	0,24	0,26
		Dp	0,01	0,01	0,04	0,02	0,04	0,00	0,03	0,02	0,04	0,02
TS [Kg/(m ² .h)]	28 d	Média	0,09	0,08	0,07	0,08	0,06	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
		Dp	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
	90 d	Média	0,11	0,10	0,07	0,09	0,11	0,10	0,09	0,07	0,11	0,13
		Dp	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02
	180 d	Média	0,06	0,08	0,08	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08
		Dp	0,02	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
CC [Kg/(m ² .min ^{0,5})]	28 d	Média	2,95	2,83	2,76	2,98	2,83	3,52	3,54	3,42	3,36	3,89
		Dp	0,07	0,09	0,16	0,12	0,25	0,14	0,12	0,17	0,10	0,14
	90 d	Média	2,77	2,69	2,74	2,68	2,82	3,07	3,05	3,17	2,57	3,19
		Dp	0,06	0,13	0,15	0,13	0,16	0,24	0,21	0,19	0,18	0,13
	180 d	Média	3,05	2,86	2,62	3,22	2,95	3,59	3,60	3,47	3,43	3,47
		Dp	0,26	0,17	0,54	0,14	0,22	0,55	0,32	0,13	0,18	0,55

VA -Valor assíntótico; IS - Índice de secagem; TS - Taxa de secagem;

CC- Coeficiente de capilaridade

Quadro 5.4 - Síntese dos resultados de resistência aos sulfatos e microestrutura – Argamassas no estado endurecido em provetes prismáticos

Ensaio	Idade	Cura	Standard					Marítima				
		Argamassa	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2
MVA [Kg/m ³]	28 d	Média	1796	1814	1805	1800	1823	1564	1787	1804	1807	1802
		Dp	25	19	11	18	2	79	7	5	5	2
	90 d	Média	1857	1851	1838	1831	1848	1809	1822	1815	1874	1858
		Dp	89	15	17	29	11	20	16	16	78	20
	180 d	Média	1741	1800	1802	1825	1826	1682	1862	1932	1828	1846
		Dp	11	40	14	13	46	66	57	25	115	116
Δ de massa Sulfatos 20º ciclo [%]	28 d	Média	48	62	61	71	72	60	51	70	68	100
		Dp	0,05	0,01	0,02	0,09	0,29	0,29	0,95	1,00	0,18	-
	90 d	Média	49	21	28	40	41	65	65	76	87	100
		Dp	1,73	0,07	0,40	0,26	0,08	0,87	0,87	0,93	1,73	-
	180 d	Média	33	16	23	23	36	100	100	100	100	100
		Dp	0,29	0,04	0,29	0,11	0,21	0,58	-	-	-	-
Pab [%]	28 d	Média	22,19	22,00	21,87	22,55	22,10	29,37	25,18	26,72	24,62	26,62
		Dp	0,44	0,27	0,29	0,15	0,21	0,09	0,08	0,24	0,17	0,02
	90 d	Média	19,12	19,39	20,34	20,37	21,13	24,34	25,56	25,55	20,67	23,66
		Dp	0,55	0,15	0,28	0,58	0,12	0,43	0,43	0,66	1,98	0,15
	180 d	Média	22,06	21,27	20,09	20,18	20,37	23,52	25,77	24,17	25,50	25,20
		Dp	0,72	0,57	0,79	0,75	0,77	0,56	0,40	0,37	1,51	0,85

MVA – Massa volúmica aparente; Pab – Porosidade aberta

Quadro 5.5 - Síntese de resultados – Provetes de argamassa sobre tijolos

Ensaio	Idade	Cura	Standard					Marítima					Aspersão inicial				
		Argamassa	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2	NHL	10T1	10T2	25T1	25T2
λ [W/(m.K)]	28 d	Média	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5
		Dp	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
	90 d	Média	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6
		Dp	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
	180 d	Média	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
		Dp	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
Ultrassons [m/s]	28 d	Média	1289	1011	1238	1061	1260	1030	1029	1048	1164	1107	1337	1342	1225	1204	1543
		Dp	49	79	106	85	100	56	84	85	94	85	31	104	95	94	118
	90 d	Média	1040	792	838	738	823	836	807	827	775	773	905	917	943	829	1033
		Dp	53,1	64,2	68,6	59,1	66,0	22,9	64,3	63,2	63,2	79,5	61,7	77,4	88,8	65,6	81,2
	180 d	Média	857	727	656	667	693	772	717	708	721	687	840	772	780	737	880
		Dp	25	66	66	52	57	26	61	57	61	63	165	66	77	60	74
CC-Karsten[(Kg/(m ² .Min ^{0,5}))]	28 d	Média	19,2	0,3	18,9	25,5	24,1	12,7	20,2	0,2	19,1	12,5	15,4	21,2	14,3	22,1	15,0
		Dp	2,8	0,1	2,4	0,4	0,8	2,7	2,6	0,2	0,9	0,4	2,3	1,0	0,8	0,7	1,3
	90 d	Média	18,1	19,2	22,0	25,5	24,1	12,7	20,2	5,9	19,1	12,5	15,4	21,2	14,3	22,1	15,0
		Dp	1,0	0,3	2,9	0,4	0,8	2,7	2,6	0,2	0,9	2,1	0,5	1,0	0,8	0,7	1,8
	180 d	Média	17,9	13,5	21,9	27,1	28,2	21,1	26,5	18,9	24,2	16,9	14,3	23,0	14,9	22,5	16,8
		Dp	0,6	0,9	0,4	1,1	1,2	1,0	0,5	1,3	0,9	0,9	0,9	0,7	1,7	2,7	1,5

λ -Condutibilidade térmica; CC-coeficiente de absorção

5.1. Características das Argamassas no Estado fresco

Na Figura 5.1 são comparados os valores de espalhamento e massa volúmica obtidos nos ensaios em estado fresco. Observa-se que de modo geral as argamassas com massas volúmicas maiores apresentam espalhamentos superiores, exceto na argamassa de referência NHL. Na análise da Figura 5.2, verifica-se uma tendência decrescente em ambos os parâmetros, com o aumento da adição de resíduos. Com a exceção apenas da argamassa NHL_25T1.

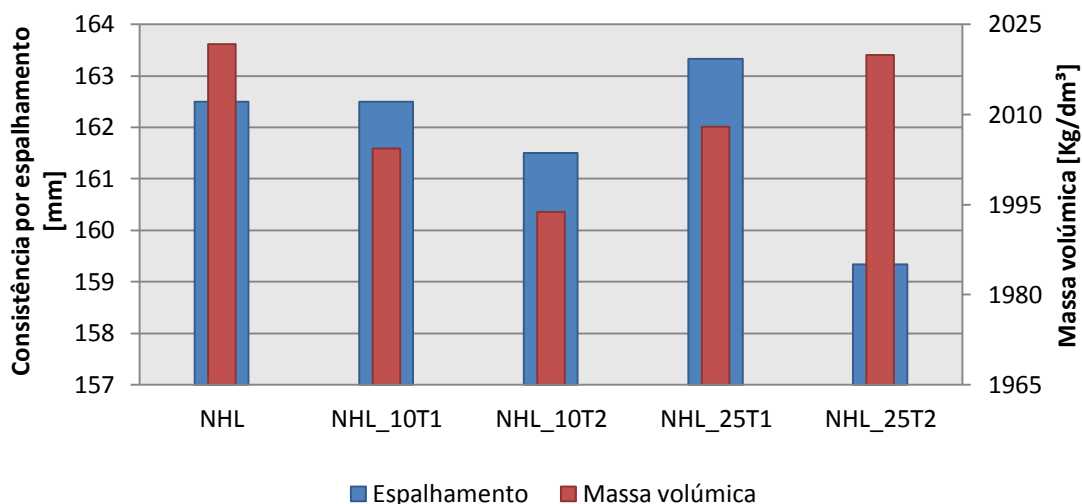


Figura 5.1 - Espalhamento e Massa volúmica

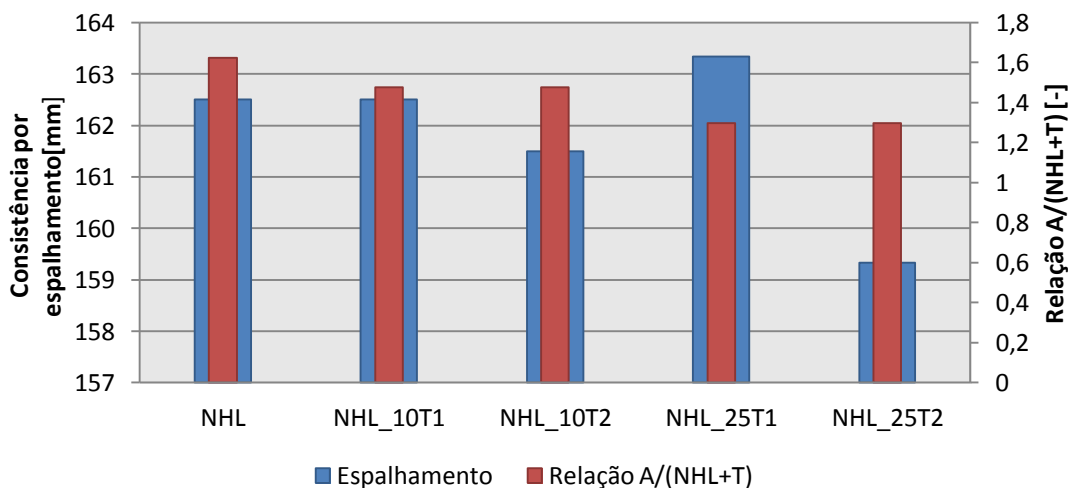


Figura 5.2 - Espalhamento e relação água/ligante

Na Figura 5.3, encontram-se representados os valores do teor em ar e retenção de água das argamassas em estado fresco. Da sua análise verifica-se a mesma tendência entre os

dois parâmetros. Pode-se concluir que o aumento de adições leva a um aumento do teor em ar, e subseqüentemente, da capacidade de retenção de água nas argamassas ensaiadas, com a exceção da NHL_25T2.

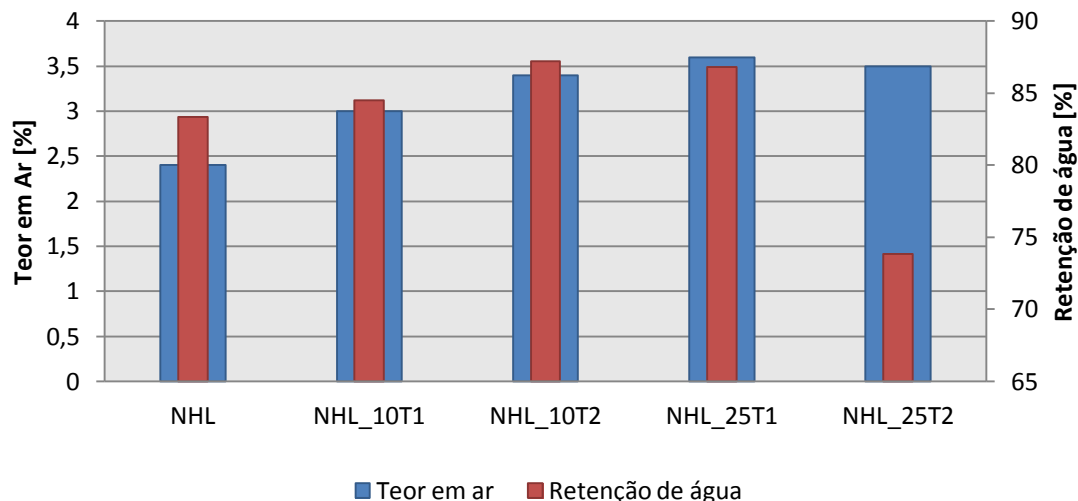


Figura 5.3 - Teor em ar e retenção de água

5.2. Parâmetros Mecânicos das Argamassas

Analizando os resultados obtidos, e cruzando os dados da resistência à tração e compressão com os do módulo de elasticidade dinâmico, verifica-se tal como seria de esperar uma correlação entre estes valores; as argamassas com menor deformabilidade são aquelas que apresentam maiores resistências à compressão e tração.

A cura revelou ser um importante fator na obtenção de resistências mecânicas das argamassas. Da análise dos resultados obtidos, verifica-se que as argamassas sujeitas à cura ST apresentam variações mínimas das resistências mecânicas ao longo do tempo. Quando comparadas com as mesmas composições sujeitas à cura M, as argamassas ST apresentam em média, resistências mecânicas superiores, nas idades de 28 e 180 dias. Aos 90 dias registam-se resistências mecânicas assim como valores de Edin superiores nas argamassas da cura M, o que leva a crer que a exposição à cura marítima retarda a obtenção de resistências mecânicas das argamassas em estudo, já que aos 180 dias os valores de Rc e Rt das argamassas apresentam diferenças mínimas entre as curas.

A introdução de resíduos cerâmicos nas argamassas, traduz-se num aumento das resistências mecânicas das mesmas, dá análise das Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6, verifica-se que em todas as idades os provetes com adições T1 e T2, apresentam valores superiores aos registados pelas respectivas argamassas de referência.

Em relação às percentagens de adição, observa-se que o aumento da adição de resíduos não revelou o aumento direto na obtenção de resistências mecânicas, ainda assim verifi-

ca-se que as composições contendo adições de 25% de T2, demonstraram maiores resistências mecânicas ainda que ligeiras em ambas as curas em todas as idades.

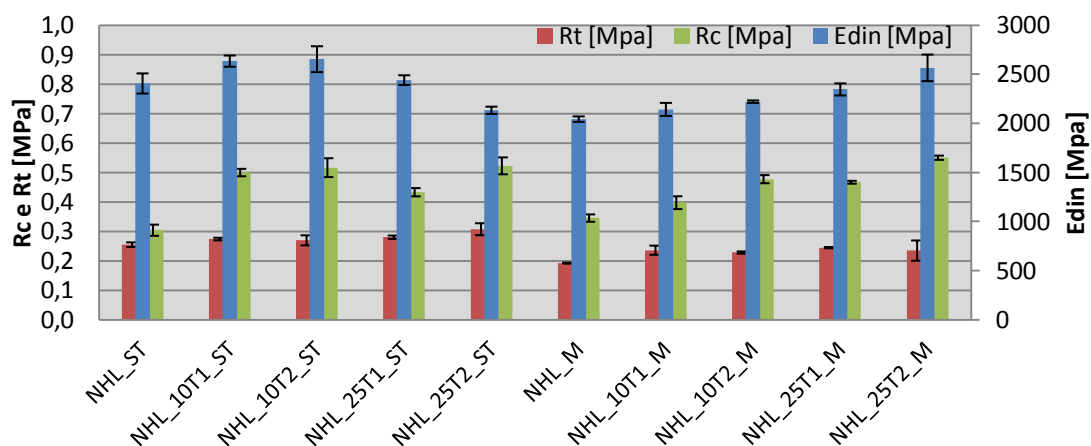


Figura 5.4 - Parâmetros mecânicos aos 28 dias

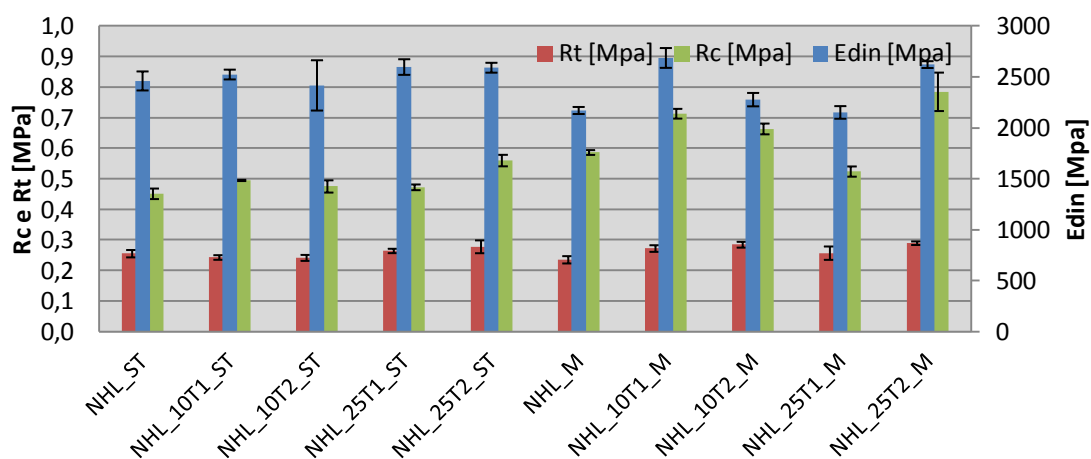


Figura 5.5 - Parâmetros mecânicos aos 90 dias

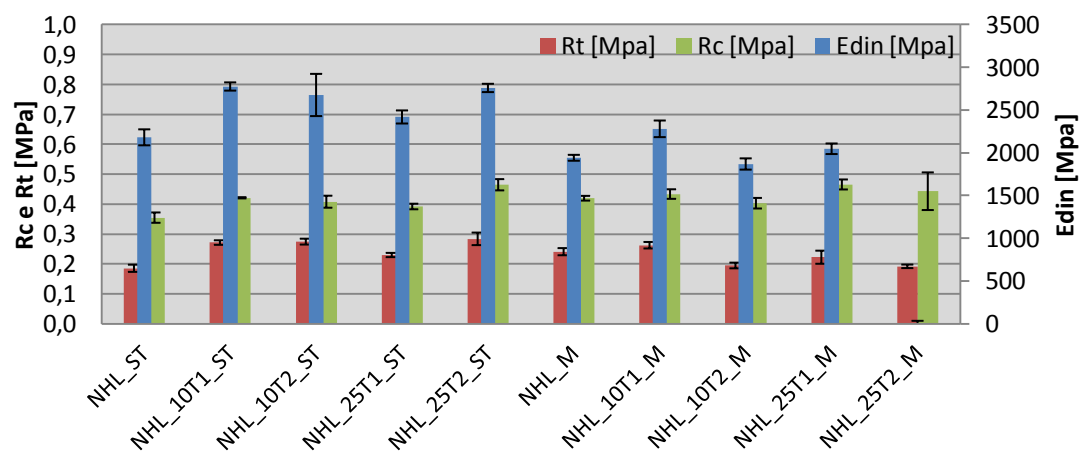


Figura 5.6 - Parâmetros mecânicos aos 180 dias

Na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 encontram-se representados os valores do módulo de elasticidade dinâmico, determinado sobre os provetes prismáticos, e a velocidade por ultrassons, obtida no ensaio em provetes sobre tijolo. Numa análise global, verifica-se uma tendência semelhante entre os valores registados no ensaio de ultrassons e de Edin, apesar dos resultados apresentados obedecerem a ordens de grandeza diferentes.

Analizando a diferença entre as curas, ambos os resultados demonstram uma menor rigidez/compacidade por parte das argamassas sujeitas à cura M.

Em relação às adições observa-se, de modo geral, uma maior rigidez por parte das argamassas com adições cerâmicas.

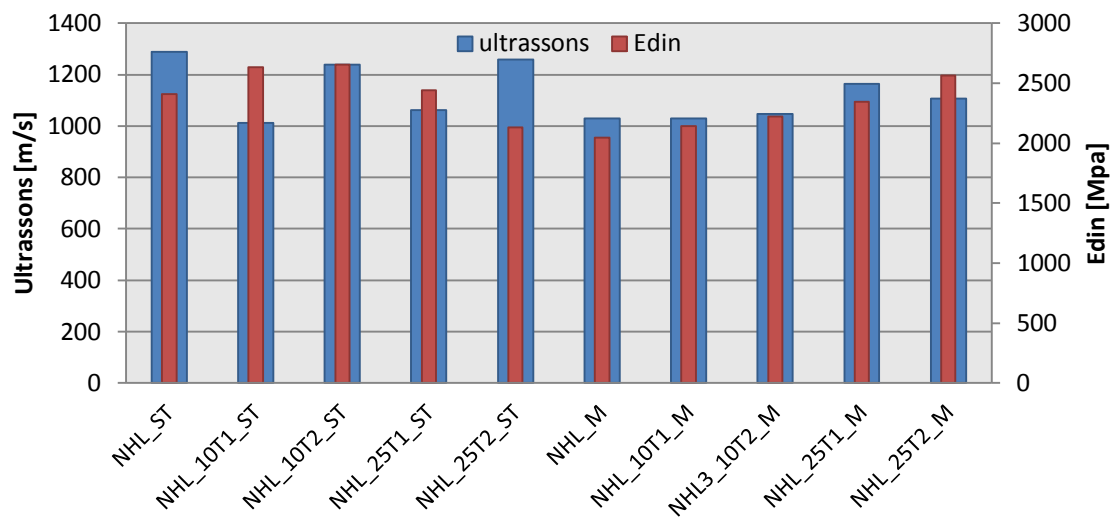


Figura 5.7 - Comparação entre Edin e ultrassons, 28 dias

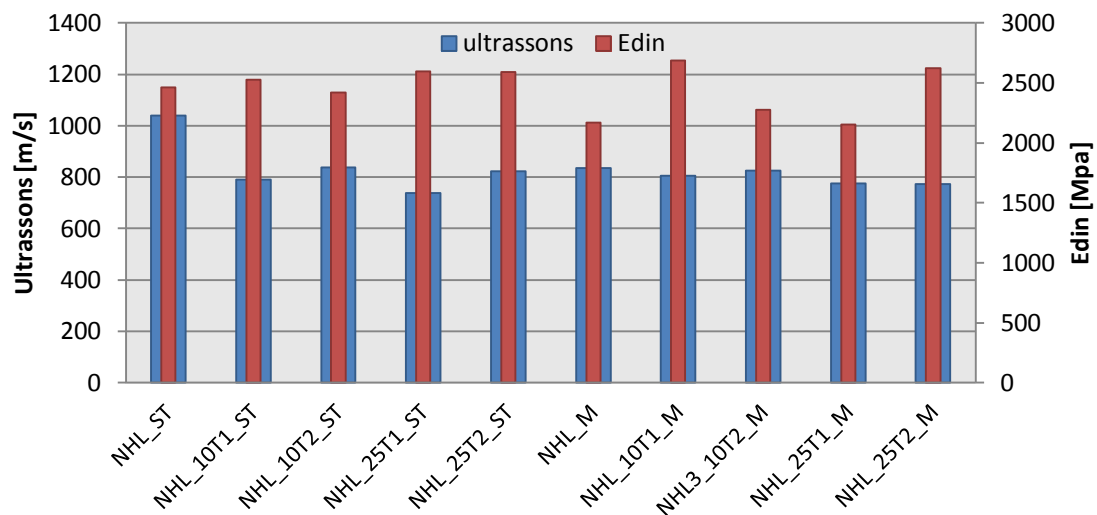


Figura 5.8 - Comparação entre Edin e ultrassons, 90 dias

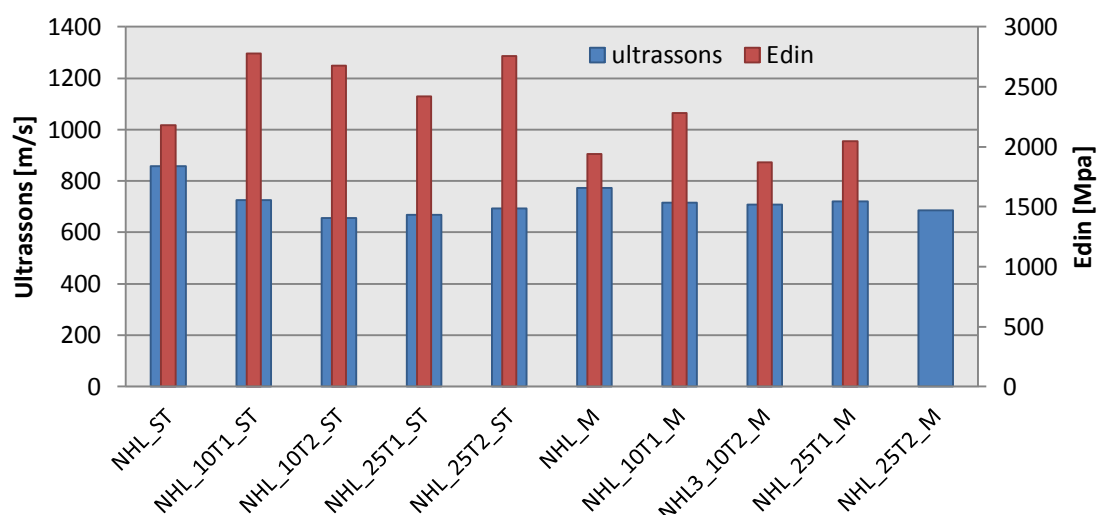


Figura 5.9 - Comparação entre Edin e Ultrassons, 180 dias

5.3. Comportamento Face à Água

Na análise dos resultados referentes ao ensaio de capilaridade e secagem, pretende-se determinar o comportamento das argamassas quando face a ciclos de molhagem e secagem. O comportamento ideal de uma argamassa nestas condições é representado por baixos valores de VA, o que traduz uma baixa absorção total de água, e absorção capilar lenta (baixo CC). Durante a fase de secagem uma argamassa ideal deverá secar rapidamente, traduzido por uma elevada taxa de secagem (TS) e de forma contínua, para isso deverá apresentar um baixo índice de secagem (IS). Reunidos estes pressupostos é feito o cruzamento dos dados obtidos na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12 de forma a avaliar as argamassas em estudo. Dada a importância da estrutura interna das argamassas durante o processo de secagem e absorção capilar é também contabilizada a porosidade aberta dos provetes.

Na análise da influência da cura verificou no ponto 4.2.6 do capítulo 4, que as argamassas sujeitas à cura ST, apresentam uma porosidade aberta (Pab) menor em relação às mesmas composições provenientes da cura M. Menor porosidade das argamassas traduz-se em menores valores de VA, na análise da evolução do IS, verifica-se que de um modo geral este é menor do que o obtido pelas argamassas da cura M. Da análise ao comportamento Podemos desta forma concluir que as argamassas da cura ST, apresentam um melhor comportamento face à água.

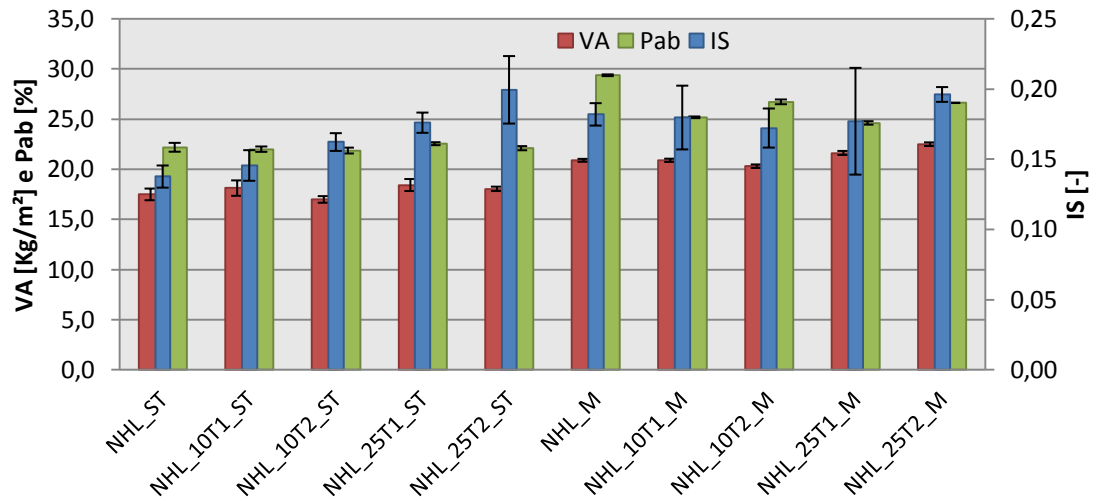


Figura 5.10 - Valor assintótico, índice de secagem e porosidade aberta aos 28 dias

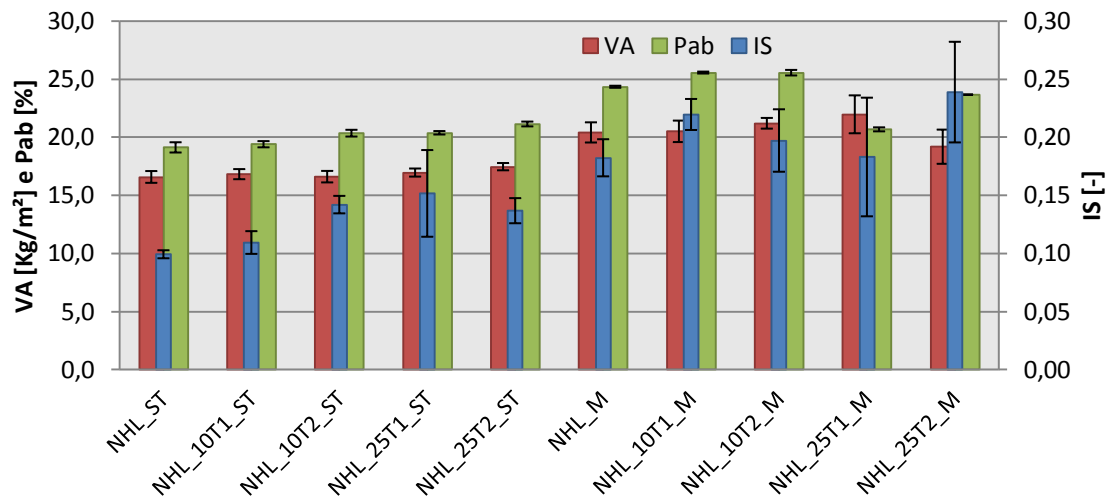


Figura 5.11 - Valore assintótico, índice de secagem e porosidade aberta aos 90 dias

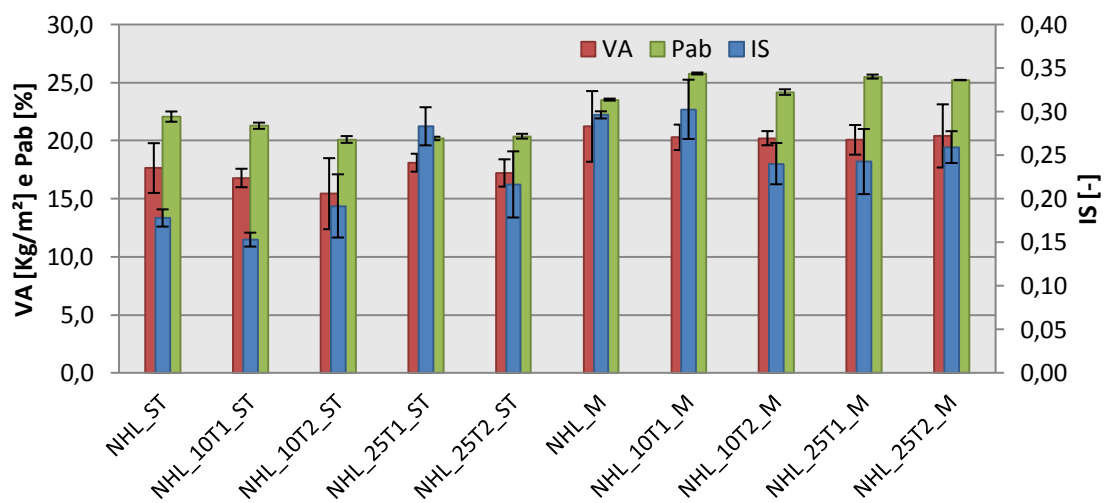


Figura 5.12 - Valor assintótico, índice de secagem e porosidade aberta aos 180 dias

Dada a proximidade entre os valores analisados anteriormente, utilizou-se um parâmetro desenvolvido por Grilo (Grilo, 2013), que relaciona do coeficiente de capilaridade CC com a taxa de secagem (TS) denominado de AB (*Aqua Behaviour*) :

$$AB = \frac{TS}{CC}$$

Equação 5.1

Onde:

AB – comportamento *aqua* [$\text{h}^{0.5}$];

TS – taxa de secagem [$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$];

CC – coeficiente de capilaridade [$\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$].

Nota: o coeficiente de capilaridade, é convertido de $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ para $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$.

A unidade apresentada por AB não tem grande significado físico mas serve sobretudo para a comparação direta entre o comportamento inicial de absorção capilar e o comportamento, também inicial, de secagem, das diversas argamassas em estudo. O ideal será que uma argamassa apresente valores de AB elevados, o que significa que por mais alta que seja a velocidade de absorção de água por capilaridade, o material tem sempre capacidade de liberar essa humidade na forma de vapor, por secagem.

Na análise efetuada às argamassas contendo adições cerâmicas verifica-se que, de modo geral, estas apresentam valores de VA semelhantes aos obtidos pelas respetivas argamassas de referência NHL; já na análise da porosidade aberta (Pab) e do índice de secagem (Is), observa-se que as argamassas adicionadas apresentam valores ligeiramente superiores aos obtidos por NHL, nas respetivas curas.

Analisando a Figura 5.13, verifica-se que 28 dias as argamassas da cura M apresentam já melhorias significativas face à argamassa de referência.

Na cura ST, verifica-se inicialmente um pior comportamento por parte das argamassas com adições T1 e T2 face à argamassa NHL. Com o evoluir do tempo de cura essa tendência inverte-se apresentado aos 180 dias melhorias significativas face à argamassa de referência.

Resumindo, as adições cerâmicas revelam-se benéficas para o comportamento das argamassas face à presença de água; verifica-se um comportamento similar entre as composições T1 e T2, ainda que as argamassas com adições T2 apresentem valores ligeiramente superiores aos da sua homóloga T1. Na cura ST as adições de 10% revelam-se melhores face ao comportamento à água; já na cura M há uma clara melhoria com o aumento de adição cerâmica para os 25 %. Em ambas as cura a argamassa T2 revelou um melhor comportamento.

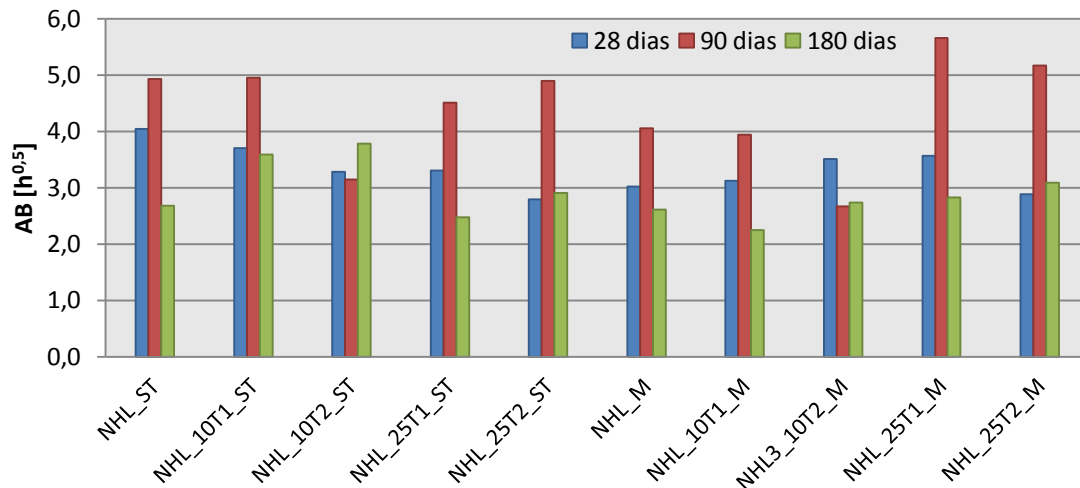


Figura 5.13 - Evolução do parâmetro AB

Nas Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16, são apresentados os valores relativos aos ensaios de ascensão capilar e absorção e água através de tubos de Karsten, sobre os provetes prismáticos e sobre tijolo, respetivamente.

São assim apresentados os valores do coeficiente de capilaridade e do coeficiente de absorção.

Da análise dos resultados obtidos, e relacionando as curas a que estiveram sujeitas, verifica-se que as argamassas aplicadas sobre o tijolo apresentam um comportamento inverso quando comparadas aos provetes prismáticos. De modo geral as composições aplicadas sobre os tijolos registam maiores coeficientes de absorção na cura ST do que na cura M; este comportamento mantém-se em todas as idades ensaiadas.

Quanto às adições verifica-se uma similaridade entre os provetes prismáticos e os em tijolo, sobretudo na cura ST, onde as argamassas com 25% de adições apresentam os maiores coeficientes em todas as idades. Já na cura M os resultados sobre o tijolo são mais dispares entre si, ao contrário dos registados nos provetes prismáticos; verifica-se que as argamassas com adições de 10% de T1 apresentam em todas as idades os maiores valores de CC.

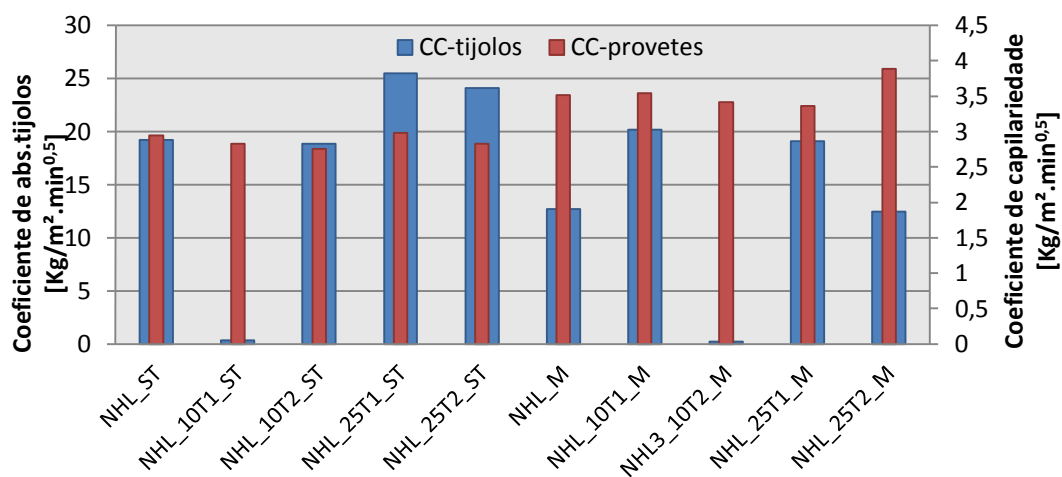


Figura 5.14 - Comportamento face à água diferença entre suporte, 28 dias

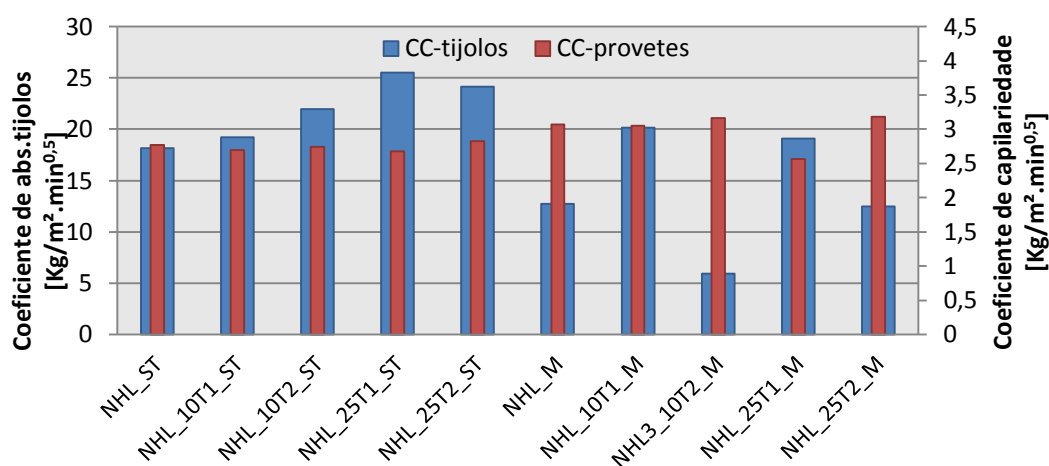


Figura 5.15 - Comportamento face à água, diferença entre suporte, 90 dias

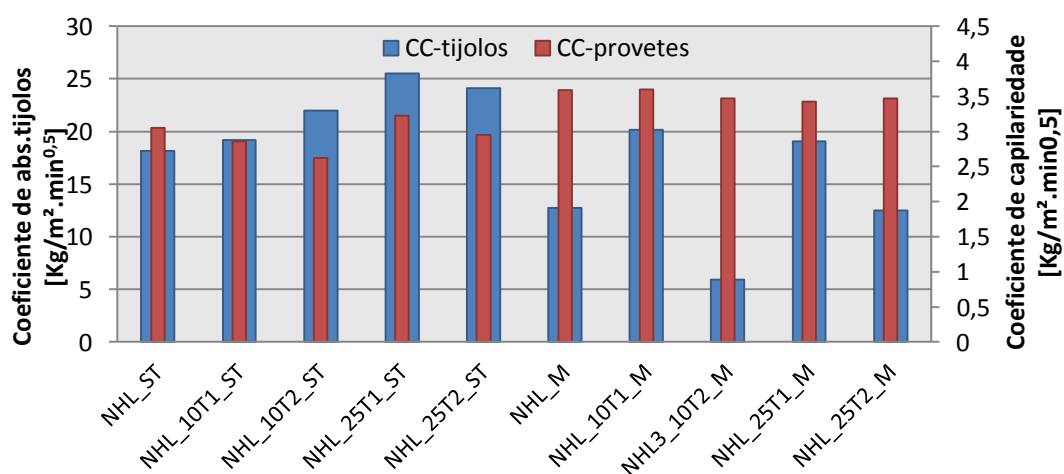


Figura 5.16 - Comportamento face à água, diferença entre suportes, 180 dias

5.4. Comportamento Face à Ação dos Sulfatos

Na análise entre as curas a que os provetes ensaiados foram sujeitos, verifica-se que as composições sujeitas à cura ST obtiveram resultados muito superiores aos registados pelas argamassas provenientes da cura M. Verificou-se ainda que, com o evoluir da idade, as argamassas da cura ST apresentaram melhorias na resistência à ação dos sulfatos. Pelo contrário, na cura M, o aumento da idade de cura levou a uma maior degradação por parte das argamassas, ao mesmo tempo os provetes sujeitos a esta cura apresentam porosidades superiores quando comparados com a cura ST.

Analizando a adição de resíduos nas argamassas e a sua influência na resistência ao ataque de sulfatos, verifica-se que, nas argamassas expostas à cura ST, as composições com adições cerâmicas apresentam perdas de massa inferiores às da argamassa de referência nas idades mais avançadas de 90 e 180 dias; observam-se no entanto menores perdas nas argamassas com adições de 10% de T1.

Nas argamassas da cura M, as composições com T1 e T2 apresentam em todas as idades perdas superiores às registadas pela argamassa de referência NHL (exceto a argamassa NHL_10T1 que aos 28 e 90 dias tem a menor perda de massa registada entre as argamassas da cura M). Verifica-se também que a adição de resíduos provoca alterações à estrutura das argamassas; observa-se um aumento da porosidade relacionada com o aumento das adições. Podemos concluir que a maior porosidade das argamassas prejudica o seu comportamento face à ação dos sulfatos; verifica-se também que as argamassas com maiores resistências mecânicas apresentam menor resistência ao ataque dos sulfatos; ainda assim a exposição a diferentes ambientes, tal como o que acontece na cura marítima é também um fator a ter em conta.

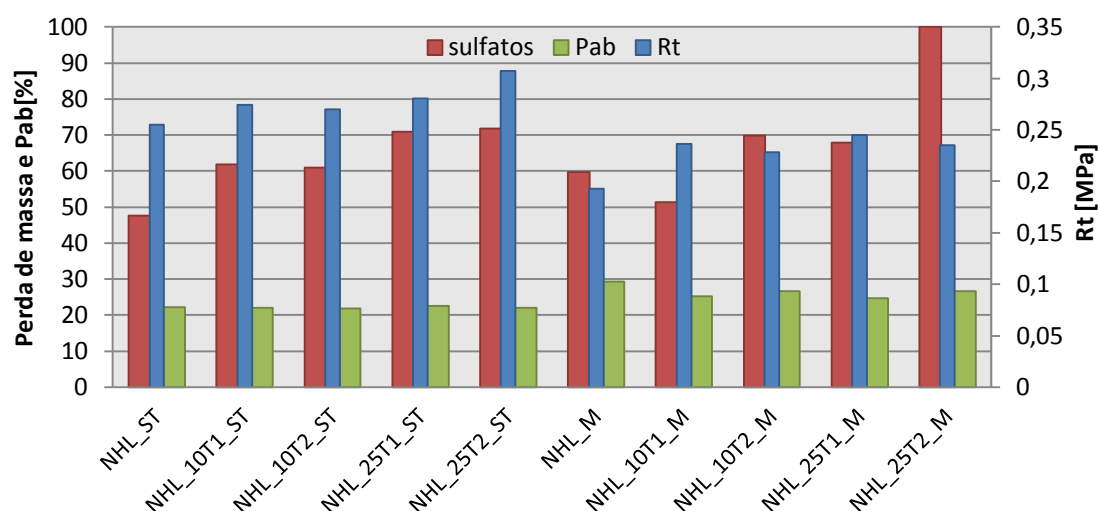


Figura 5.17 - Resistência aos sulfatos, 28 dias

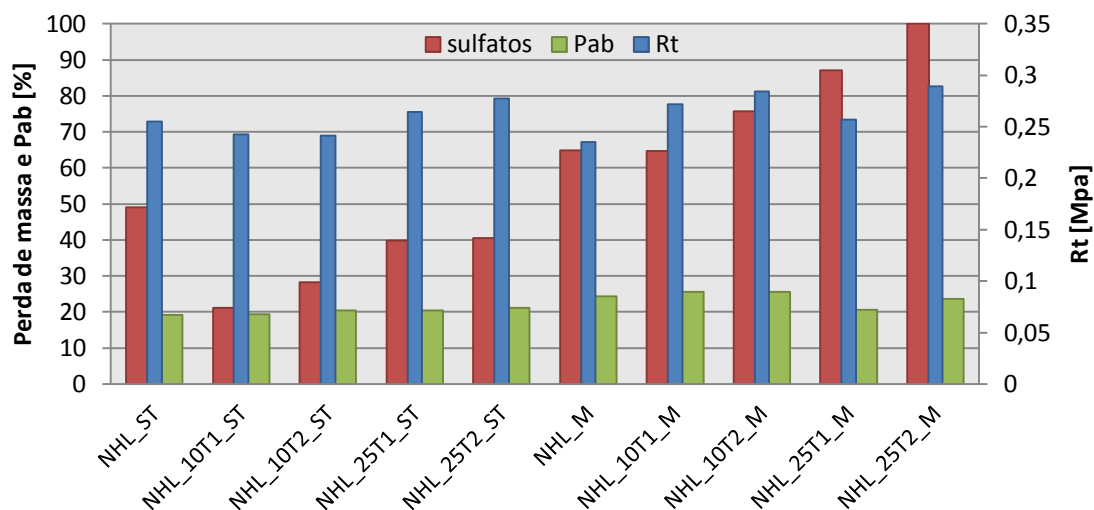


Figura 5.18 - Resistência aos sulfatos, 90 dias

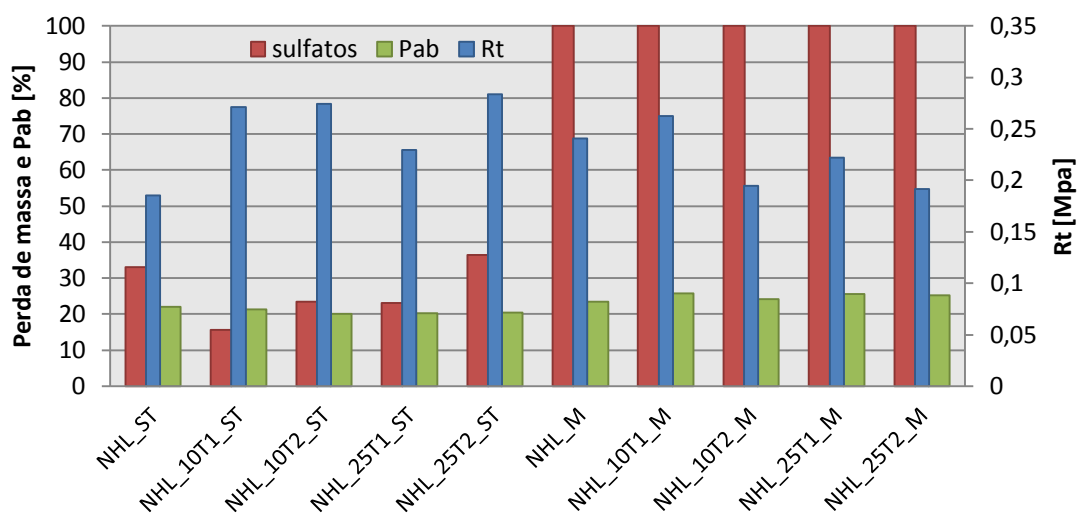


Figura 5.19 - Resistência aos sulfatos, 180 dias

5.5. Utilização das Argamassas em Edifícios Antigos

Sobre a aplicação de argamassas em edifícios antigos, Veiga et al., (Veiga et al., 2010) definiram uma gama indicativa de valores para argamassas endurecidas aos 90 dias que as argamassas devem cumprir por forma a garantir a sua compatibilidade com o suporte ou com as argamassas pré-existentes. Foram definidos valores mecânicos e de comportamento à água para a aplicação em rebocos e para o refechamento de juntas, que podem ser consultados no Quadro 2.1 do capítulo 2.

Rebocos

No Quadro 5.6, encontram-se representados os valores obtidos aos 90 dias pelas argamassas estudadas no presente trabalho, cruzando-os com os limites definidos por Veiga (Veiga et al., 2010).

Verifica-se que todas as argamassas comprem os requisitos definidos para os valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade; quanto à resistência à compressão a NHL_10T1 e NHL_25T2, ambas da cura M, apresentam valores demasiados altos para a sua aplicação neste tipo de edifícios muito antigos.

No comportamento face a água nenhuma das argamassas compre os limites definidos, sendo que todas elas registam coeficientes de capilaridade, de acordo com a gama (Veiga et al., 2010), demasiado elevados para que possam ser aplicadas em edifícios antigos. No entanto, situações semelhantes têm sido encontradas mesmo com argamassas de cal aérea com a mesma areia utilizada na presente dissertação (Faria et al, 2012), pelo que poderá esse ser neste caso um fator condicionante.

Resumindo, em termos mecânicos a generalidade das argamassas compre os requisitos definidos; já no comportamento face à presença de água, as composições estudadas revelaram absorções demasiado rápidas, segundo (Veiga et al., 2010).

Quadro 5.6 - Verificação de requisitos na aplicação de rebocos, interiores e exteriores

Argamassa	Parâmetros mecânicos aos 90 dias			Comportamento à água	
	Rt [Mpa]	Rc[Mpa]	Edin[Mpa]	CC[Kg/(m ² .min ^{0,5})]	
NHL_ST	✓ 0,26	✓ 0,45	✓ 2462	✗	2,8
NHL_10T1_ST	✓ 0,24	✓ 0,49	✓ 2525	✗	2,7
NHL_10T2_ST	✓ 0,24	✓ 0,48	✓ 2418	✗	2,7
NHL_25T1_ST	✓ 0,26	✓ 0,47	✓ 2598	✗	2,7
NHL_25T2_ST	✓ 0,28	✓ 0,56	✓ 2592	✗	2,8
NHL_M	✓ 0,24	✓ 0,59	✓ 2172	✗	3,1
NHL_10T1_M	✓ 0,27	✗ 0,71	✓ 2688	✗	3,0
NHL3_10T2_M	✓ 0,28	✓ 0,66	✓ 2278	✗	3,2
NHL_25T1_M	✓ 0,26	✓ 0,52	✓ 2153	✗	2,6
NHL_25T2_M	✓ 0,29	✗ 0,78	✓ 2622	✗	3,2

Refechamento de juntas

No Quadro 5.7 encontra-se representado o resultado do cruzamento dos resultados obtidos aos 90 com os limites definidos para a aplicação de argamassas em refechamento de juntas em edifícios antigos. Através da sua análise verifica-se claramente que nenhuma das composições cumpre os requisitos definidos. Observa-se, no entanto, que as composições NHL_10T1, NHL10_T2 e NHL25T2 apresentam resistências à compressão suficientes para a sua aplicação.

Quadro 5.7 - Verificação de requisitos no refechamento de juntas.

Argamassa	Parâmetros mecânicos aos 90 dias			Comportamento à água
	Rt [Mpa]	Rc[Mpa]	Edin[Mpa]	CC[Kg/m ² .min ^{0,5}]
NHL_ST	✗ 0,26	✗ 0,45	✗ 2462	✗ 2,8
NHL_10T1_ST	✗ 0,24	✗ 0,49	✗ 2525	✗ 2,7
NHL_10T2_ST	✗ 0,24	✗ 0,48	✗ 2418	✗ 2,7
NHL_25T1_ST	✗ 0,26	✗ 0,47	✗ 2598	✗ 2,7
NHL_25T2_ST	✗ 0,28	✗ 0,56	✗ 2592	✗ 2,8
NHL_M	✗ 0,24	✗ 0,59	✗ 2172	✗ 3,1
NHL_10T1_M	✗ 0,27	✓ 0,71	✗ 2688	✗ 3,0
NHL3_10T2_M	✗ 0,28	✓ 0,66	✗ 2278	✗ 3,2
NHL_25T1_M	✗ 0,26	✗ 0,52	✗ 2153	✗ 2,6
NHL_25T2_M	✗ 0,29	✓ 0,78	✗ 2622	✗ 3,2

5.6. Aplicação de Rebocos em Alvenarias

A norma NP EN 998-1 (IPQ, 2010) classifica as argamassas para aplicação de rebocos em alvenaria segundo as suas características mecânicas e comportamento face à presença de água; estes valores podem ser consultados no Quadro 2.2, presente no capítulo 2.

Tendo por base os valores definidos pela norma, foram classificadas as argamassas estudadas. Pela análise do Quadro 5.8, verifica-se que a generalidade das argamassas é classificada na classe de resistência mínima, CSI (com a exceção das argamassas de referencia em ambas as a curas e da NHL_10T1, que não comprem os requisitos de resistência à compressão necessários). Deve ainda ser referido que em termos do coeficiente de capilaridade, todas as argamassas são classificadas também na classe básica, W0, uma vez que não possuem hidrofugantes.

Quadro 5.8 - Classificação das argamassas segundo NP EN 998-1

Argamassas	RC aos 28 dias	CC[Kg/m ² .min ^{0.5}]
NHL_ST	n.d	W0
NHL_10T1_ST	CSI	W0
NHL_10T2_ST	CSI	W0
NHL_25T1_ST	CSI	W0
NHL_25T2_ST	CSI	W0
NHL_M	n.d	W0
NHL_10T1_M	n.d	W0
NHL_10T2_M	CSI	W0
NHL_25T1_M	CSI	W0
NHL_25T2_M	CSI	W0

5.7. Comparação de Resultados de Trabalhos semelhantes.

Influência do traço na NHL3.5

Valério (Valério,2013) estudou o comportamento de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de traço volumétrico 1:3 com substituição de massa de cal por metacaulino.

Este estudo foi efetuado em simultâneo com a presente dissertação; foram utilizados os mesmos materiais, procedimentos e ensaios.

São comparados parâmetros mecânicos e de comportamento face à água, em argamassas sujeitas à cura ST e M aos 28, 90 e 180 dias; os resultados são identificados pela letra (V) referente às argamassas de Valério (Valério, 2013) e (M) correspondendo às composições estudadas no presente trabalho.

Na Figura 5.20 encontram-se representados os resultados referentes ao ensaio de resistência à tração por flexão (Rt) e resistência à compressão (Rc); verifica-se tal como seria de esperar que as argamassas de traço volumétrico 1:3 apresentam resistências mecânicas superiores às composições de traço 1:4 em todas as idades e curas. Observam-se no entanto tendências idênticas; em ambos os estudos as argamassas registam picos de resistência aos 90 dias, e resistências ligeiramente superiores nas composições expostas ao ambiente marítimo da cura M.

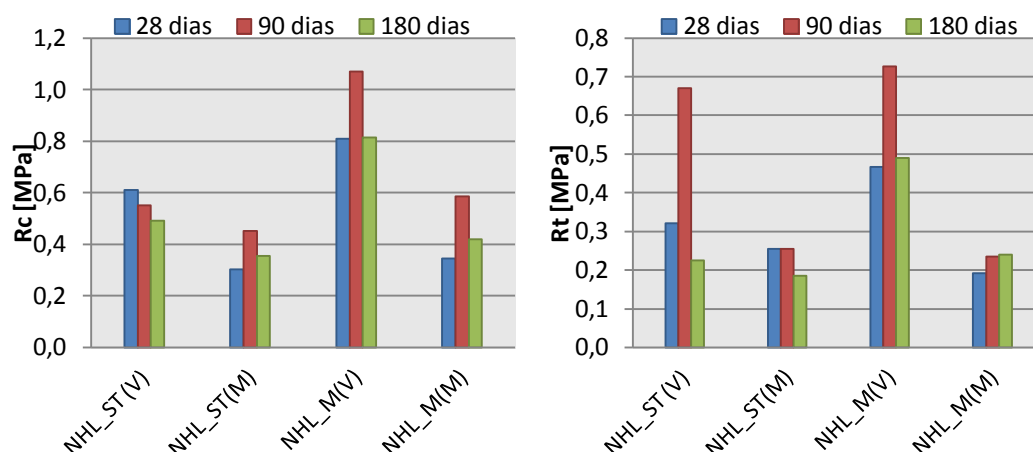


Figura 5.20 - Comparação da evolução dos parâmetros mecânicos, entre traços diferentes.

Na análise ao comportamento face à presença de água, apresentado na Figura 5.21. Verifica-se que o comportamento das argamassas difere consoante as curas.

Na cura ST as argamassas de traços diferentes apresentam um comportamento semelhante; as composições de traço 1:4 absorvem água mais lentamente e registam taxas de secagem ligeiramente inferiores (Figura 5.21). Observando a evolução do valor assintótico e Índice de secagem; verifica-se que as argamassas de traço 1:4 absorvem menos água e tem uma capacidade de secagem semelhante, quando comparadas com as composições de traço 1:3.

Na cura M o comportamento entre os traços das argamassas de traço 1:3 é superior; observam-se menores velocidades de absorção aliadas a maiores taxas de secagem, em termos globais absorvem menos água e secam com maior eficácia (Figura 5.21).

Resumindo verifica-se que o traço influencia o comportamento das argamassas de cal hidráulica natural, traços mais fortes garantem resistências mecânicas superiores, já em relação ao comportamento face à água; verifica-se que um traço mais fraco obtém um comportamento melhor. No caso de exposição a um ambiente marítimo como o da cura M, a utilização de um traço maior parece beneficiar o comportamento face à presença de água.

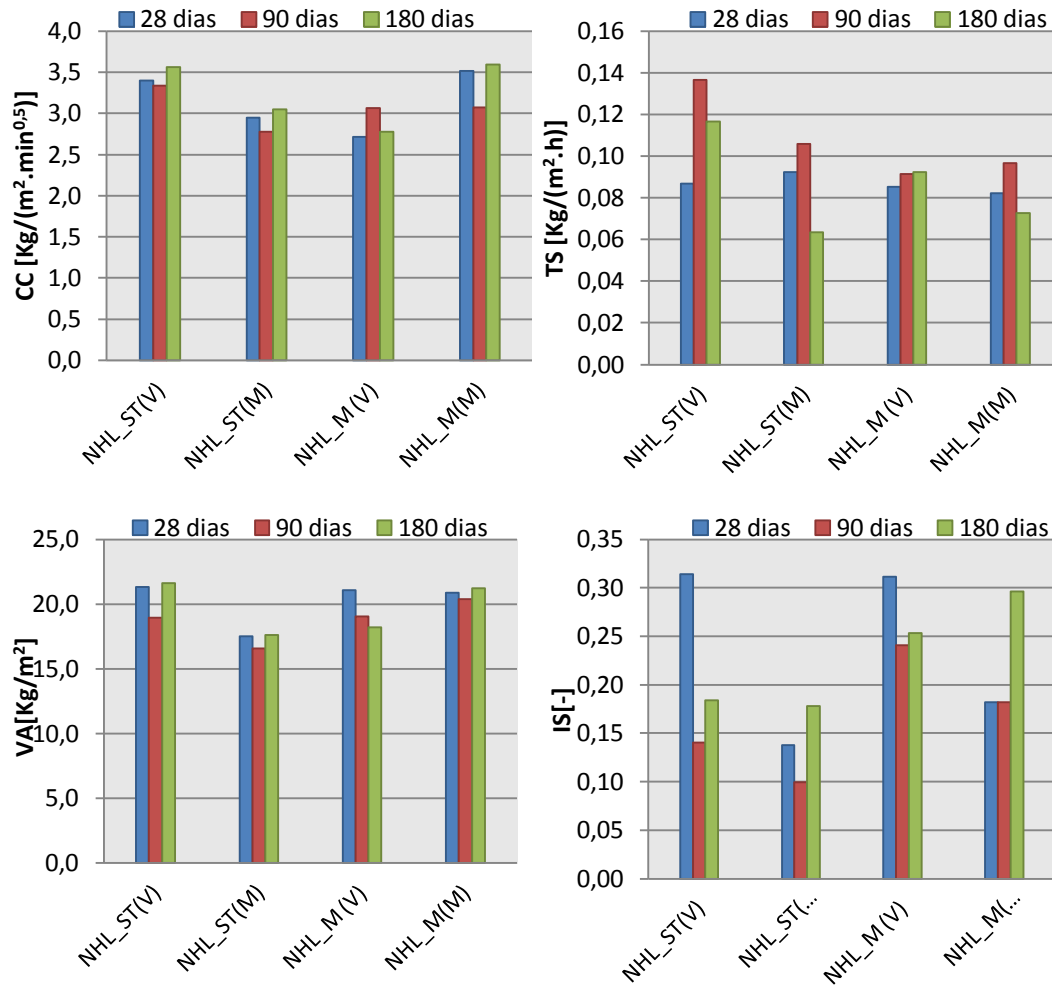


Figura 5.21 – Comparação de comportamento face à água, entre traços diferentes.

Influência do traço na introdução de resíduos

Tendo em consideração outros estudos efetuados na caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com adições de resíduos cerâmicos, Fontes (Fontes, 2013) desenvolveu um trabalho semelhante, caracterizando argamassas de NHL3.5 de traço volumétrico 1:3 com substituição parcial de cal por resíduo cerâmico, idêntico ao resíduo T2 utilizado no presente estudo, nas proporções de 0; 5 e 10%. Esta caracterização foi efetuada com materiais, ensaios e procedimentos idênticos aos do presente trabalho. A comparação será feita em função do traço ponderal, já que a cal utilizada no trabalho de Fontes (Fontes, 2013) possui uma baridade diferente da cal utilizada no presente trabalho. No Quadro 5.9 encontram-se representados os traços ponderais das argamassas.

Efetuaram-se comparações mecânicas e ao nível do comportamento face à água entre argamassas sujeitas à cura standard (ST) aos 28 dias, os resultados são identificados pelas

letras (F) referente às argamassas de Fontes (Fontes, 2013) e (M) correspondendo às composições ensaiadas no presente trabalho.

Quadro 5.9 - Comparação de traços ponderais.

Traço ponderal		
Argamassas	(NHL+T):Arg	NHL: T: Arg
NHL (F)	1:5	1:0:5
NHL_5T (F)	1:5	1:0,05:5,3
NHL_10T (F)	1:5	1:0,1:5,6
NHL (M)	1:7,7	1:0:7,7
NHL_10T2 (M)	1:7	1:0,1:7,7
NHL_25T2 (M)	1:6,1	1:0,2:7,7

Na Figura 5.22 encontram-se representados os resultados obtidos aos 28 dias por Fontes (Fontes, 2013) (F) e no presente trabalho (M), das argamassas sujeitas à cura ST.

Verifica-se tal como seria de esperar, que a argamassa de traço ponderal 1:5 NHL (F) apresenta parâmetros mecânicos muito superiores aos da NHL (M).

Ainda assim, verificam-se ganhos de resistências mecânicas superiores nas argamassas com adição de resíduos, relativamente à respetiva argamassa de referência.

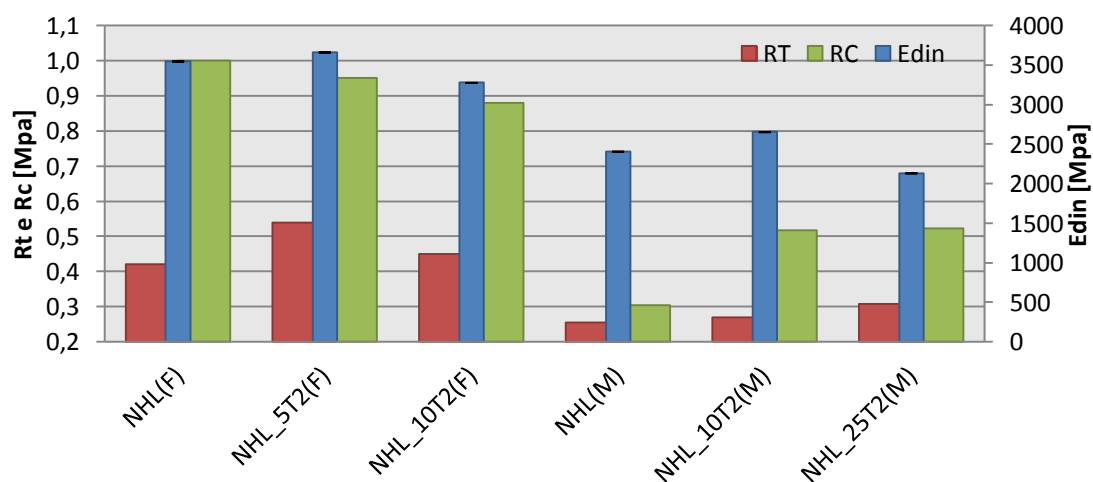


Figura 5.22 - Comparação de parâmetros mecânicos aos 28 dias na cura ST

Analisando a Figura 5.23, verifica-se que a substituição de cal por resíduo cerâmico leva a uma diminuição da porosidade aberta das argamassas. No caso das argamassas com adição de resíduo a porosidade não sofre alterações entre as diversas composições aos 28 dias de cura. No caso do valor assintótico, não se registam variações entre argamassas estudadas. Quanto ao índice de secagem, não é possível efetuar uma comparação entre os resultados dos

dois estudos, pois o intervalo de tempo em que o ensaio é executado, tem grande influência nos resultados de IS. O ensaio de secagem de Fontes (Fontes, 2013) tem uma duração muito superior à do presente estudo; deste modo os valores de IS não são comparáveis. Na análise ao CC e TS, verifica-se que as argamassas de traço ponderal 1:5, apresentam valores superiores de capilaridade e taxa de secagem. No caso das argamassas de traço mais forte a substituição de cal por resíduo revela-se benéfica, sobretudo ao nível da taxa de secagem; já nas argamassas com adições de resíduo cerâmico, o subsequente aumento do traço ponderal é prejudicial na capacidade de secagem inicial das argamassas.

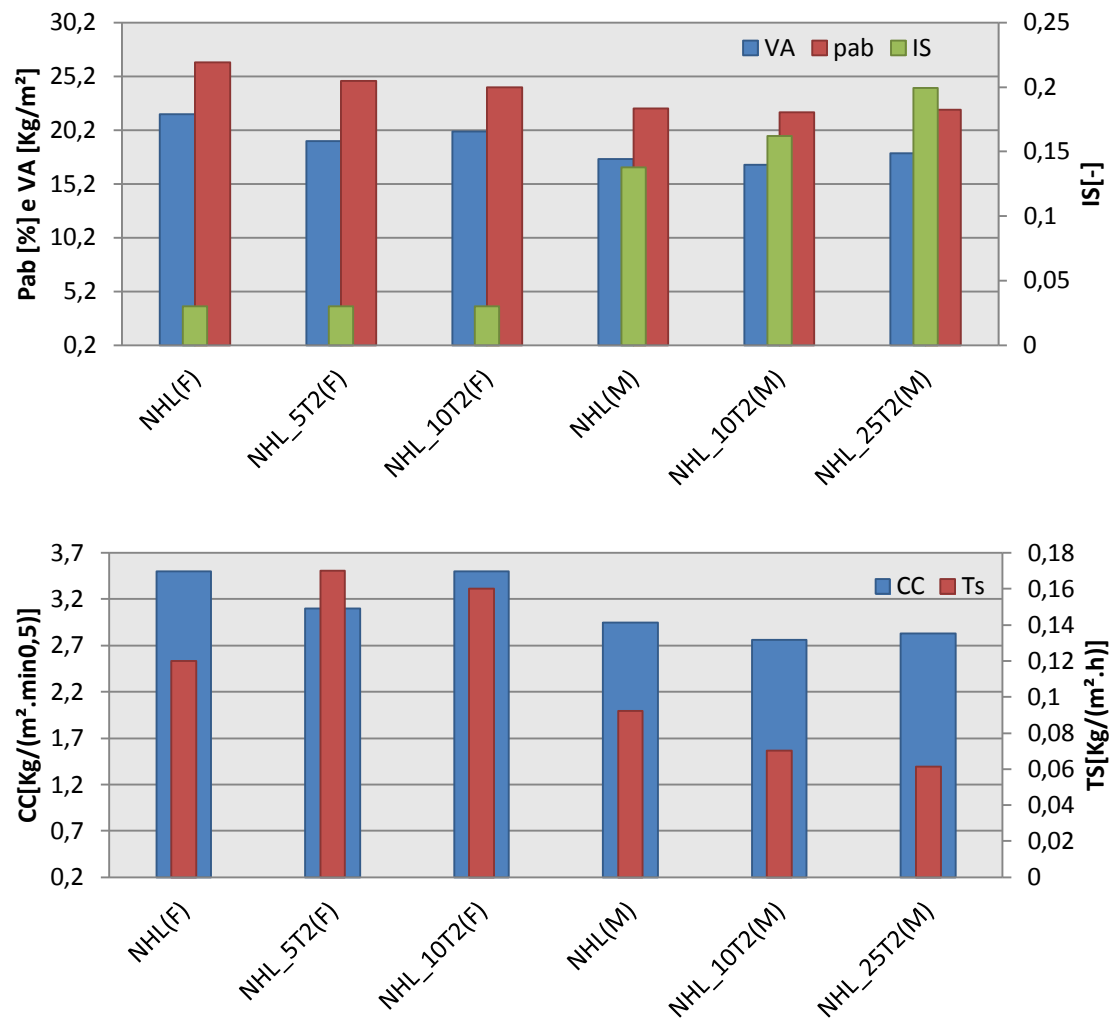


Figura 5.23 - Comparação do comportamento face à água aos 28 dias

Resumo da comparação de resultados

Resumindo globalmente, o traço das argamassas de NHL3.5 revela grande importância nas resistências mecânicas obtidas pelas argamassas. Tal como espectável, as argamassas com traços volumétricos mais fortes, registam resistências mecânicas superiores.

Em termos de comportamento face à presença de água, as argamassas de traços mais fracos demonstram comportamentos melhores, todavia em condições de exposição marítima, as argamassas de traço mais forte revelam maior eficácia.

Na comparação entre a adição e substituição de resíduos por cal, em argamassas de NHL3.5. Verifica-se que a adição de resíduos, gera incrementos de resistências mecânicas superiores, dado o subsequente aumento do traço, no caso das argamassas com adições. No comportamento face à presença de água, as diferenças verificam-se sobretudo ao nível da capacidade de secagem das argamassas. Com a substituição de cal por resíduo cerâmico, observa-se um aumento da capacidade de secagem inicial das argamassas; nas argamassas com adições de resíduo verifica-se uma tendência inversa.

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões finais

A utilização de adições cerâmicas em argamassas de cal é há muito conhecida. Existe registo da sua utilização por civilizações antigas já extintas. Ainda assim muitas destas argamassas perduraram até aos dias de hoje. Com o aparecimento do cimento Portland a utilização da cal hidráulica caiu em desuso. As necessidades hoje existentes ao nível da reabilitação e manutenção do património edificado, tornam a utilização de argamassas à base de cal como um ponto fundamental na manutenção das características destes edifícios.

Deste modo, esta dissertação iniciou-se com uma breve exposição sobre a importância da reutilização de resíduos provenientes do sector da construção civil, e da sua incorporação como agregados em argamassas de cal hidráulica natural. Foram descritos os ensaios efetuados na caracterização do comportamento mecânico e físico das argamassas estudadas, assim como as curas a que estiveram sujeitas. Descreveram-se também os materiais utilizados, assim como as suas propriedades. O trabalho experimental baseou-se maioritariamente em normas europeias, de modo a possibilitar a sua replicação e a garantir a validade dos resultados obtidos. Participou-se na construção de uma Estação de Exposição Natural de Revestimentos (EENR), constituída por nove muretes de tijolo. As composições com adição de resíduos foram aplicadas sobre um dos muretes, replicando a sua utilização num contexto prático.

O estudo desenvolvido teve como principal objetivo caracterizar argamassas com adições de dois resíduos provenientes da indústria cerâmica, nas proporções de 10 e 25%, e compreender de que forma estas adições influenciam a natureza das argamassas de cal hidráulica natural, de traço volumétrico de 1:4 quando expostas a curas diferentes. A escolha por um traço fraco em ligante, procurou avaliar de que forma os resíduos poderiam atuar numa argamassa com estas características.

Este tipo de argamassa revela ter um grande potencial ao nível da sustentabilidade dos recursos utilizados; diminuindo a quantidade de ligante e introduzindo matérias reaproveitadas, desta forma diminui-se a quantidade de energia incorporada nestes materiais (Corinaldesi, 2012).

Considerando a composição, é possível afirmar que a adição de resíduos cerâmicos proporciona melhorias nas características das argamassas de cal hidráulica natural. Constatou-se que as argamassas com adições de 10 e 25% de T1 e T2, apresentam resistências mecânicas superiores às das argamassas de referência. Neste contexto as composições com adições de 25%, registaram resistências mecânicas consequentemente superiores às restantes argamassas, constatando-se que o aumento das percentagens de adição de resíduos, revela incre-

mentos nas resistências. O resíduo cerâmico T2 demonstrou ser aquele que mais favorece as resistências, tal como seria de esperar dada a menor dimensão das partículas deste resíduo.

Quanto ao comportamento à água, as argamassas com adições demonstraram absorver menos água que as argamassas de referência; ainda assim as composições com adições cerâmicas apresentaram uma capacidade de secagem superior. Novamente as composições com adições de 25% revelaram um melhor comportamento entre as argamassas com adições; dentro destas, destaca-se a composição com 25% de adição T2 com o melhor comportamento face à absorção e secagem de água.

Relativamente à resistência à ação de sulfatos, as adições cerâmicas revelaram ser benéficas, pois as composições com adições demonstram aos 180 dias menor perda de massa, quando comparadas com a argamassa de referência; neste aspeto as adições de 10% apresentaram um melhor comportamento face às de 25%.

Outro dos aspetos avaliados na presente dissertação foi a influência da cura. As argamassas foram expostas a três curas no caso dos provetes sobre tijolo, e a duas curas no caso dos provetes prismáticos. A cura M demonstrou ter um efeito prejudicial sobre o comportamento das argamassas ensaiadas, uma vez que em todos os parâmetros foram registadas prestações inferiores por parte das argamassas expostas às condições marítimas. Sobretudo à ação dos sulfatos, onde se registaram perdas de massa muito superiores, de tal modo, aos 180 dias todas as composições apresentaram 100% de perda de massa. Esta situação denota um comportamento ineficiente da adição destes resíduos em argamassas com este traço quando localizadas em zona perto do mar. É de registar que esta situação não se detetou nas restantes curas laboratoriais.

A caracterização do comportamento das argamassas com a evolução da idade também se revela importante, já que em alguns parâmetros estudados notam-se diferenças significativas entre idades. No que respeita à R_c registou-se um pico aos 90 dias em ambas as curas, aos 180 dias verificaram-se valores próximos dos obtidos aos 28 dias, e o mesmo foi observado no que diz respeito à taxa de secagem.

No ensaio de resistência aos sulfatos a diferença entre idades é significativa, e com comportamentos distintos dependendo da cura. Na cura standard registaram-se perdas de massa inferiores com o aumento do tempo de cura. Enquanto na cura M o aumento do tempo de cura leva a uma maior deterioração dos provetes ensaiados, muito provavelmente por uma maior contaminação prévia destes pelo ambiente marítimo.

As composições com adições cerâmicas demonstraram ser bastante adequadas para a aplicação em edifícios antigos, segundo os parâmetros estabelecidos por Veiga (Veiga et al., 2010), ainda que algumas argamassas da cura M registassem mesmo assim, resistências à compressão superiores aos limites estabelecidos. Tal como foi descrito anteriormente, regis-

tou-se um pico nas resistências à compressão aos 90 dias, pelo que aos 180 dias todas as argamassas cumprem com os parâmetros estabelecidos.

Pela análise à influência do traço verificou-se que apesar de se obterem menores resistências mecânicas, as argamassas de traço 1:4 apresentam um melhor comportamento face à água, absorvendo menos água e secando com maior eficácia, quando comparadas com argamassas de traço volumétrico 1:3. Deste modo, verifica-se que a utilização de resíduos cerâmicos em argamassas de cal hidráulica natural traz benefícios, quer ao nível da sustentabilidade, quer ao nível do comportamento das argamassas.

De um modo geral a argamassa NHL_25T2, demonstrou ser aquela que melhor satisfaz as características exigidas para a substituição de rebocos antigos, demonstrando ainda uma melhor aderência à alvenaria, quando aplicada em sistema de rebocos sobre o murete construído para o efeito, o que seria um fator preponderante na escolha de uma argamassa a utilizar em obra.

6.2.Desenvolvimentos Futuros

Finalizada a dissertação, considera-se importante dar continuação aos trabalhos desenvolvidos sobre este tema. Deste modo sugerem-se os seguintes estudos:

- Continuar a avaliar e caracterizar as argamassas aplicadas na estação de envelhecimento de rebocos, nomeadamente a sua permeabilidade à água sobre baixa pressão, assim como a evolução das suas características ao longo do tempo e a sua suscetibilidade à fendilhação.
- A avaliação das mesmas argamassa formuladas no presente trabalho a idades mais avançadas, nomeadamente as expostas à cura marítima.
- Avaliar a reatividade pozolânica do resíduo T1 e comparar com a do resíduo T1 e com valores de pozolanas conhecidas, caso do metacaulino.
- Efetuar a análise aos compostos mineralógicos presentes nas argamassas estudadas, através de ensaios de DRX e microscopia eletrónica de varrimento (MEV), particularmente no que se refere aos provetes sujeitos a cura M.

BIBLIOGRAFIA

- Ball, R., El-Turk, A., & Allen, G. (2011). Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars. *Materials Science and Engineering* , vol.528. pp. 3193–3199.
- Baronio, G., & Binda, L. (1997). tudy of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials* , vol.11(1) pp. 41-46.
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., & Uğurlu, E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Cement and Concrete Research* , vol.36. pp. 1115-1122.
- Callebau, K., Elsen, J., Van Balen, K., & Viane, W. (2001). Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement? *Cement and Concrete Research* , vol.31, pp. 397-403.
- CEN (1998a). *1015-6:1998 - Methods os test for mortar masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Brussels: European commitee for standardization.
- CEN (1999). *EN 1015-11:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardener mortar*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2002). *EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (1999). *EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (1998b). *EN 1015-7:1998 - Methods of test for mortar masonry - part 7: Determination of ari content of fresh mortar*. Brussels: European commitee for standardization.
- CEN (2009). *EN 15801:2009 -Conservation of cultural property- Test methods- Determination of absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2010). *EN 459-1- Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Brussels: CEN.
- CEN (2001). *EN 459-1:2001 - Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*.
- CEN (1999). *prEN 1015-8 - draft European Standard, Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CNR-ICR (1988). *Normal 29/88 – Caratterizzazione del materiale lapideo, valutazione della olegradazione e degli effetti dei trattamenti conservativi. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Istituto Centrale per il Restauro.*

- Corinaldesi, V. (2012). Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction and Building Materials* , vol.35. pp. 778–784.
- Couto, A., & Couto, A. (2007). Especificidades e Exigências das Argamassas na Reabilitação de Edifícios Antigos. *APFAC*. Lisboa.
- Faria, P. (2004). Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas. *Tese de Doutoramento*. Caparica: FCT-UNL.
- Faria, P. (2012b). Argamassas Sustentáveis. *2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono*. Lisboa.
- Faria, P. (2011). Projeto fct metacal - Procedimentos de ensaio de argamassas. FCT-UNL: Departamento de Engenharia Civil.
- Faria, P. (2009). Resistance to salts of lime and pozzolan mortars. *International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry* .
- Faria, P., & Henriques, F. (2004). Current Mortars in Conservation: An Overview. *International Journal for Restoration* , vol.10, pp. 609-622.
- Faria, P., & Silva, V. (2013). Natural hydraulic lime mortars: influence of the aggregates. *3rd Historic Mortars Conference*. Glasgow.
- Faria, P., Silva, V., Grilo, J., Carneiro, J., Mergulhão, D., & Antunes, R. (2012a). Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural. *CIRea*. Lisboa.
- Fontes, T. (2013). Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional. *Dissertação de Mestrado*. Lisboa: FCT-UNL.
- Fontes, T., Faria, P., & Silva, V. (2012). Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaolino e resíduo cerâmico. *4º Congresso Construção* .
- Gálvez, F. P. (2013). Sustainable restoration of traditional building systems in the historical centre of Sevilla (Spain). *Energy and Buildings* , vol.62. pp. 648-659.
- Grilo, J. (2013). Caracterização de Argamassas de Cal Hidráulica Natural NHL3.5 de Fabrico Nacional. *Dissertação de Mestrado*. Lisboa: FCT-UNL.
- Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos Silva, A., & Velosa, A. (2013b). New Natural Hydraulic Lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Aceite para Revisão na Construction and Building Materials* .
- Grilo, J., Santos Silva, A., Faria, P., Gameiro, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2013a). Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Aceite para publicação na Construction and Building Materials* .
- Gulotta, D., Goidanich, S., Tedeschi, C., Nijland, T. G., & Toniolo, L. (2013). Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: Compositional and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials* , pp. 31-42.
- Hanley, R., & Pavía, S. (2008). A study of the workability of natural hydraulic lime mortars. *Materials and Structures* , vol.41, pp. 373-381.
- Harris, D. J. (1999). A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials. *Building and Environment* , vol.34, pp. 751-758.

- Henriques, F. (2007). Comportamento higrotérmico de Edifícios. Caparica: DEC-FCT-UNL.
- Henriques, F., & Faria, P. (2008). O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património. *Revista Engenharia Civil*, número 31, pp. 29-37.
- INE (2013). *O Parque habitacional e a sua reabilitação - análise e evolução 2001-2011*. Lisboa: Instituto nacional de Estatística.
- IPQ (2002). *NP EN 1097-3 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Caparica: IPQ.
- IPQ (2001). *NP EN 12370:2001 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. Caparica: IPQ.
- IPQ (2006). *NP EN 14146- Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica: IPQ.
- IPQ (2006). *NP EN 14146- Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica: IPQ.
- IPQ (2008). *NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica: IPQ.
- IPQ (2011). *NP EN 459-1 – Cal de construção. Parte1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica: IPQ.
- IPQ (2000). *NP EN 933-1:2000 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de penneiração*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2010). *NP EN 998-1- Especificações de argamassas para alvenaria Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Caparica: IPQ.
- Lanas, J., Bernal, P., Bello, M., & J.I, A. G. (2004). Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, vol.34, pp. 2191–2201.
- LNEC (2010). *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa: FE Pa 39.
- Maier, P. L., & Durham, S. A. (2012). Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, vol.29, pp. 428–437.
- Margalha, M., Veiga, R., & Brito, J. (2007). Influência das areias na qualidade de argamassas decal aérea. Lisboa: APFAC.
- Massena, R. (2011). Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural. *Dissertação de Mestrado*. Lisboa: FCT-UNL.
- Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2013). Viability of ceramic residues in lime-based mortars. *3rd Historic Mortars Conference*. Glasgow.
- Monterio, A., & Faria, P. (2006). Troia Roman Baths (Portugal) – Assessment of history of interventions. *International Seminar in Conservation*, pp. 273-282.

Mosquera, M., Silva, B., Prieto, B., & Ruiz-Herrera, E. (2006). Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapour transport. *Cement and Concrete Research* , vol.36, pp. 1635-1642.

Murta, A., Varum, H., & Pinto, T. (2011). Advantages of using raw materials in ancient and recent buildings. *Sustainability in Energy and Buildings*, vol.33, pp. 35-44.

O'Farrell, M., Sabir, B., & Wild, S. (2006). Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement & Concrete Composites* , pp. 790-799.

Radonjanin, V., Malešev, M., Marinkovic', S., & Saed Al Maly, A. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* , vol.27, pp. 1503–1511.

Rato, V. (2006). Influência da Microestrutura Morfológica no Comportamento das Argamassas. *Tese de Doutorado*. Caparica: FCT-UNL.

RILEM. (1980). TC 25-PEM – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. *Materials & Structures*, vol.13, pp. 204-207.

Sabbioni, C., Zappia, G., Riontino, C., Blanco-Varela, M., Aguilera, J., Puertas, F. et al. (2001). Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars. *Atmospheric Environment* , vol. 35, pp. 539-548.

Scheuer, C., Gregory, A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings* , vol.35, pp. 1049–1064.

Sequeira, A., Frade, D., & Gonçalves, P. (2007). Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação. Lisboa: 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção.

Sousa-Coutinho, A. (1998). Fabrico e propriedades do betão - Volume I. Lisboa: LNEC.

Theodoridou, M., Ioannou, I., & Philokyprou, M. (2013). New evidence of early use of artificial pozzolanic material in mortars. *Journal of Archaeological Science* , vol.40, pp. 3263-3269.

Thormark, C. (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment* , vol.41, pp. 1019–1026.

Torgal, F., Miraldo, S., Labrincha, J., & De Brito, J. (2012). An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials* , vol.36, pp. 141-150.

Torgal, P., & Jalali, E. (2008). Tendências para a sustentabilidade . *Engenharia e vida* , pp. 0-5.

Valério, J. (2013). Argamassas de Cal hidráulica Natural NHL - Influência do traço, do metacaulino e da cura. *Dissertação de Mestrado*. Caparica: FCT-UNL.

Vargas, D. (2013). Argamassas de cal aérea e metacaulino. *Dissertação de Mestrado*. Caparica: FCT-UNL.

- Veiga, R. (2003). Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Lisboa: LNEC.
- Veiga, R., Fragata, A., Velosa, A., Magalhães, A., & Margalha, G. (2010). Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. *Architectural Heritage* , vol.4, pp. 177-195.
- Veiga, R., Velosa, A., & Magalhães, A. (2009). Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, vol.23, pp. 318-327.
- Velosa, A., & Cachim, P. (2008). Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions. *Construction and Building Materials* , vol.23, pp. 2107-2111.
- Venkatarama, R. J. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings* , vol. 35. pp. 129–137.

ANEXOS

Anexo I – Ficha técnica da cal hidráulica natural NHL 3,5, da Secil

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 - CAL HIDRÁULICA NATURAL

1. DESCRIÇÃO

A Secil NATURAL LIME NHL 3,5 é um ligante hidráulico constituído maioritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio. Obtém-se por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem.

A Secil NATURAL LIME NHL 3,5 é classificada como NHL 3,5 segundo a NP EN 459-1.

A Secil NATURAL LIME NHL 3,5 é um ligante singular, pois além da presa hidráulica, apresenta também presa por carbonatação.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Características Físicas		Valor	Norma
Cor		Beije	-
Baridade (kg/dm³)		0,65 ± 0,05	EN 459-1
Densidade (g/cm³)		2,7	-
Finura (%)		90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 2,0	EN 459-1
Blaine (cm²/g)		9000	-
Expansibilidade (mm)		≤ 2,0	EN 459-1
Água livre (%)		≤ 2,0	EN 459-1
Teor de ar (%)		≤ 5	EN 459-1
Penetração (mm)		<10 e >50	EN 459-1
Tempo de presa (h)		inicial final	> 1,0 ≤ 30,0

Características Mecânicas		Valor	Norma
Resistência mecânica à compressão 28 dias (MPa)		≥ 3,5 e ≤ 10	EN 459-1

Características Químicas		Valor	Norma
Sulfato (SO ₃) (%)		≤ 2,0	EN 459-1
Cal disponível Ca(OH) ₂ (%)		≥ 25,0	EN 459-1

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retração das argamassas hidráulicas (p.ex. argamassas de alvenaria, argamassa de reboco e acabamentos).

Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos.

4. FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS

A dosagem de Secil NATURAL LIME NHL 3,5 numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina. Nas argamassas de reboco e de assentamento, a Secil NATURAL LIME NHL 3,5, tem um papel preponderante como único ligante ou conjugado com outros.

Misturar previamente a Secil NATURAL LIME NHL 3,5 com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade. Como valor orientativo usar uma relação água/ligante de 0,6 expresso em volume.

Secil Argamassas

Secil Mattingança, S.A.
Avenida do Cliente, Apartado 2 | 2406 – 909 – Macieira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmattinganca.pt

1/3

www.secilmattinganca.pt

Anexo II - Resultados individuais dos ensaios realizados

Quadro 6.1 - Espalhamento em estado fresco

Espalhamento [mm]		
NHL	162,5	3,1
NHL_10T1	162,5	1,5
NHL_10T2	161,5	1,9
NHL_25T1	163,3	3,9
NHL_25T2	163,3	3,9

Quadro 6.2 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

28 dias	Provete	Edin [MPa]	Média	Média
NHL3,5_ST	M1ST1	2659	2695,500	2407,17
		2709		
		2703		
		2711		
	M1ST2	2251	2253,250	
		2248		
		2255		
		2259		
	M1ST3	2263	2272,750	
		2258		
		2272		
		2298		
NHL_10T1_ST	M2ST1	2589	2663,750	2634,83
		2674		
		2543		
		2849		
	M2ST2	2520	2510,500	
		2502		
		2506		
		2514		
	M2ST3	2739	2730,250	
		2716		
		2738		
		2728		
NHL_10T2_ST	M3ST1	2385	2408,750	2654,58
		2412		
		2420		
		2418		
	M3ST2	2543	2540,000	
		2533		

	M3ST3	2557	3015,000	
		2527		
		2942		
		3102		
		2987		
		3029		
NHL_25T1_ST	M4ST1	2325	2344,000	2441,42
		2311		
		2359		
		2381		
	M4ST2	2468	2412,500	
		2420		
		2416		
		2346		
	M4ST3	2562	2567,750	
		2587		
		2559		
		2563		
NHL_25T2_ST	M5ST1	2861	2878,000	2134
		2850		
		2906		
		2895		
	M5ST2	2785	2741,250	
		2707		
		2755		
		2718		
	M5ST3	785	782,750	
		791		
		776		
		779		
NHL_M	M1M1	2039	2040,250	2043,92
		2025		
		2046		
		2051		
	M1M2	2093	2111,750	
		2108		
		2119		
		2127		
	M1M3	1960	1979,750	
		1998		
		1971		
		1990		
NHL_10T1_M	M2M1	2114	1987,000	2142,83
		1901		
		2020		

	M2M2	1913	2266,500	
		2258		
		2383		
		2200		
		2225		
	M2M3	2158	2175,000	
		2189		
		2193		
		2160		
NHL_10T2_M	M3M1	2193	2197,500	2221,75
		2205		
		2211		
		2181		
	M3M2	2243	2246,000	
		2249		
		2239		
		2253		
	M3M3	2185	2193,000	
		2200		
		2191		
		2196		
NHL_25T1_M	M4M1	2286	2324,750	2346,83
		2360		
		2371		
		2282		
	M4M2	2134	2117,500	
		2074		
		2121		
		2141		
	M4M3	2393	2401,000	
		2389		
		2421		
NHL_25T2_M	M5M1	2515	2464,000	2566,2
		2364		
		2513		
	M5M2	2801	2776,500	
		2738		
		2766		
		2801		
	M5M3	2695	2719,750	
		2744		
		2721		
		2719		

Quadro 6.3 - Modulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias

90 dias	Provete	Edin [MPa]	Média	Média
NHL3,5_ST	M1ST4	2508	2451,250	2461,83
		2482		
		2331		
		2484		
	M1ST5	2257	2245,250	
		2272		
		2218		
		2234		
	M1ST6	2700	2689,000	
		2710		
		2708		
		2638		
NHL_10T1_ST	M2ST4	2575	2558,000	2524,58
		2547		
		2561		
		2549		
	M2ST5	2608	2620,250	
		2610		
		2660		
		2603		
	M2ST6	2384	2395,500	
		2399		
		2413		
		2386		
NHL_10T2_ST	M3ST4	2426	2432,250	2418,08
		2428		
		2440		
		2435		
	M3ST5	2264	2251,000	
		2247		
		2238		
		2255		
	M3ST6	3016	2571,000	
		3040		
		1143		
		3085		
NHL_25T1_ST	M4ST4	2658	2682,750	2598,33
		2681		
		2700		
		2692		

	M4ST5	2404	2384,500	
		2356		
		2388		
		2390		
	M4ST6	2740	2727,750	
		2710		
		2723		
		2738		
NHL_25T2_ST	M5ST4	2463	2457,000	2591,58
		2447		
		2443		
		2475		
	M5ST5	2650	2646,750	
		2662		
		2644		
		2631		
	M5ST6	2655	2671,000	
		2665		
		2705		
		2659		
NHL_M	M1M4	2257	2238,500	2171,63
		2230		
		2225		
		2242		
	M1M5	2076	2104,750	
		2132		
		2097		
		2114		
	M1M6	0	0,000	
		0		
		0		
		0		
NHL_10T1_M	M2M4	2835	2873,250	2687,58
		2882		
		2901		
		2875		
	M2M5	2440	2427,000	
		2432		
		2420		
		2416		
	M2M6	2663	2762,500	
		2748		
		2858		
		2781		
NHL_10T2_M	M3M4	2416	2360,750	2278,25

		2329		
		2369		
		2329		
	M3M5	2268	2195,750	
		2069		
		2259		
		2187		
	M3M6	2491	2493,000	
		2487		
		2503		
		2491		
	NHL_25T1_M	M4M4	2207	
2220				
2209				
2215				
M4M5		2033	1946,500	
		1829		
		1916		
		2008		
M4M6		1985	2017,500	
		2080		
		2000		
		2005		
NHL_25T2_M	M5M4	2657	2634,000	2622,33
		2630		
		2621		
		2628		
	M5M5	2576	2589,500	
		2567		
		2549		
		2666		
	M5M6	2592	2599,500	
		2606		
		2599		
		2601		

Quadro 6.4 – Modulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias

180 dias	Provete	Edin [Mpa]	Média
NHL3,5_ST	M1ST7	2285	2018,000
		1766	
		2041	
		1980	
	M1ST8	2115	2081,000
		2237	
		1873	
		2099	
	M1ST9	2461	2443,000
		2467	
		2422	
		2422	
NHL_10T1_ST	M2ST7	2455	2569,750
		2569	
		2607	
		2648	
	M2ST8	2618	2720,500
		2860	
		2697	
		2707	
	M2ST9	2344	3035,750
		3265	
		3279	
		3255	
NHL_10T2_ST	M3ST7	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	
	M3ST8	2676	2676,000
		2688	
		2650	
		2690	
	M3ST9	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	
NHL_25T1_ST	M4ST7	2379	2175,500
		1632	
		2339	
		2352	

	M4ST8	2651	2634,250
		2622	
		2635	
		2629	
	M4ST9	2415	2447,000
		2522	
		2452	
		2399	
NHL_25T2_ST	M5ST7	3263	3214,250
		3256	
		3090	
		3248	
	M5ST8	2435	2440,500
		2460	
		2435	
		2432	
	M5ST9	2624	2620,250
		2627	
		2618	
		2612	
NHL_M	M1M7	1927	1941,250
		1950	
		1922	
		1966	
	M1M8	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	
	M1M9	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	
NHL_10T1_M	M2M7	2232	2196,250
		2213	
		2108	
		2232	
	M2M8	2273	2238,500
		2089	
		2263	
		2329	
	M2M9	2379	2405,750
		2393	
		2469	
		2382	
NHL_10T2_M	M3M7	2163	1934,000

		1924	
		1725	
		1924	
	M3M8	1520	1803,000
		1821	
		2049	
		1822	
	M3M9	2124	2028,000
		1964	
		1996	
		2028	
NHL_25T1_M	M4M7	2023	2072,750
		2137	
		2112	
		2019	
	M4M8	2219	2148,250
		2095	
		2135	
		2144	
	M4M9	2125	1911,000
		1865	
		1863	
		1791	
NHL_25T2_M	M5M7	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	
	M5M8	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	
	M5M9	0	TOPOS
		0	
		0	
		0	

Quadro 6.5 - Resistência à tração e compressão aos 28 dias

28 dias		Provete	RT [MPa]	Média	Desv.Pad	RC [MPa]	Média	Desv.Pad
NHL3,5_ST	M1ST	M1ST1	0,26	0,24	0,02	0,31	0,30	0,04
		M1ST2	0,22			0,26		
		M1ST3	0,24			0,35		
NHL_10T1_ST	M2ST	M2ST1	0,26	0,27	0,01	0,50	0,50	0,03
		M2ST2	0,28			0,47		
		M2ST3	0,28			0,53		
NHL_10T2_ST	M3ST	M3ST1	0,25	0,27	0,03	0,47	0,52	0,06
		M3ST2	0,24			0,48		
		M3ST3	0,32			0,61		
NHL_25T1_ST	M4ST	M4ST1	0,27	0,28	0,01	0,39	0,43	0,03
		M4ST2	0,28			0,45		
		M4ST3	0,30			0,46		
NHL_25T2_ST	M5ST	M5ST1	0,36	0,31	0,04	0,47	0,52	0,06
		M5ST2	0,31			0,60		
		M5ST3	0,26			0,50		
NHL_M	M1M	M1M1	0,19	0,19	0,00	0,33	0,35	0,03
		M1M2	0,19			0,33		
		M1M3	0,20			0,38		
NHL_10T1_M	M2M	M2M1	0,23	0,24	0,03	0,45	0,40	0,04
		M2M2	0,28			0,39		
		M2M3	0,20			0,35		
NHL_10T2_M	M3M	M3M1	0,23	0,23	0,01	0,51	0,48	0,03
		M3M2	0,22			0,48		
		M3M3	0,24			0,44		
NHL_25T1_M	M4M	M4M1	0,25	0,25	0,00	0,46	0,47	0,01
		M4M2	0,25			0,46		
		M4M3	0,24			0,48		
NHL_25T2_M	M5M	M5M1	0,28	0,24	0,03	0,55	0,55	0,01
		M5M2	0,20			0,54		
		M5M3	0,22			0,56		

Quadro6.6 - Resistência à tração e compressão aos 90 dias

90 dias		Provete	Rt [MPa]	Média	Desv.Pad	RC [MPa]	Média	Desv.Pad
NHL3,5_ST	M1ST	M1ST4	0,29	0,25	0,03	0,50	0,45	0,03
		M1ST5	0,23			0,41		
		M1ST6	0,25			0,45		
NHL_10T1_ST	M2ST	M2ST4	0,24	0,24	0,01	0,49	0,49	0,00
		M2ST5	0,25			0,49		
		M2ST6	0,24			0,50		
NHL_10T2_ST	M3ST	M3ST4	0,24	0,26	0,04	0,48	0,48	0,04
		M3ST5	0,23			0,42		
		M3ST6	0,32			0,52		
NHL_25T1_ST	M4ST	M4ST4	0,31	0,26	0,04	0,46	0,47	0,02
		M4ST5	0,22			0,45		
		M4ST6	0,26			0,50		
NHL_25T2_ST	M5ST	M5ST4	0,25	0,28	0,02	0,51	0,56	0,04
		M5ST5	0,28			0,57		
		M5ST6	0,29			0,60		
NHL_M	M1M	M1M4	0,23	0,24	0,01	0,59	0,59	0,02
		M1M5	0,25			0,57		
		M1M6	0,23			0,60		
NHL_10T1_M	M2M	M2M4	0,34	0,31	0,02	0,76	0,71	0,03
		M2M5	0,28			0,68		
		M2M6	0,32			0,70		
NHL_10T2_M	M3M	M3M4	0,32	0,31	0,02	0,65	0,66	0,04
		M3M5	0,29			0,63		
		M3M6	0,33			0,71		
NHL_25T1_M	M4M	M4M4	0,28	0,26	0,02	0,57	0,52	0,03
		M4M5	0,23			0,51		
		M4M6	0,26			0,49		
NHL_25T2_M	M5M	M5M4	0,32	0,30	0,03	0,87	0,78	0,06
		M5M5	0,26			0,74		
		M5M6	0,33			0,74		

Quadro 6.7 - Resistência à tração e compressão aos 180 dias

180 dias		Provete	Rt [MPa]	Média	Desv.Pad	RC [MPa]	Média	Desv.Pad
NHL3,5_ST	M1ST	M1ST4	0,00	0,16	0,05	0,32	0,35	0,04
		M1ST5	0,11			0,41		
		M1ST6	0,21			0,33		
NHL_10T1_ST	M2ST	M2ST4	0,25	0,27	0,02	0,38	0,42	0,05
		M2ST5	0,27			0,39		
		M2ST6	0,29			0,49		
NHL_10T2_ST	M3ST	M3ST4	0,31	0,27	0,03	0,49	0,41	0,06
		M3ST5	0,24			0,38		
		M3ST6	0,00			0,35		
NHL_25T1_ST	M4ST	M4ST4	0,23	0,23	0,03	0,35	0,39	0,06
		M4ST5	0,26			0,47		
		M4ST6	0,20			0,36		
NHL_25T2_ST	M5ST	M5ST4	0,33	0,28	0,04	0,49	0,46	0,02
		M5ST5	0,23			0,45		
		M5ST6	0,30			0,46		
NHL_M	M1M	M1M4	0,24	0,24	0,00	0,32	0,42	0,07
		M1M5	0,00			0,46		
		M1M6	0,00			0,48		
NHL_10T1_M	M2M	M2M4	0,25	0,26	0,02	0,42	0,43	0,01
		M2M5	0,24			0,45		
		M2M6	0,29			0,43		
NHL_10T2_M	M3M	M3M4	0,21	0,19	0,01	0,34	0,40	0,09
		M3M5	0,18			0,34		
		M3M6	0,19			0,53		
NHL_25T1_M	M4M	M4M4	0,20	0,22	0,02	0,53	0,47	0,05
		M4M5	0,25			0,43		
		M4M6	0,21			0,43		
NHL_25T2_M	M5M	M5M4	0,17	0,20	0,03	0,41	0,44	0,02
		M5M5	0,24			0,47		
		M5M6	0,17			0,45		

Quadro 6.8 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 28 dias

28 Dias	Provete	M1 seca [g]	M2 hidrostática [g]	M3 saturada [g]	P.A [%]	MV [kg/m3]
NHL3,5_ST	M1ST1	82,580	46,957	92,063	21,024	1830,799
	M1ST2	45,646	25,992	51,57	23,161	1784,580
	M1ST3	52,962	29,784	59,649	22,391	1773,380
NHL_10T1_ST	M2ST1	40,327	22,943	45,404	22,604	1795,423
	M2ST2	53,975	30,44	60,347	21,306	1804,761
	M2ST3	51,025	29,43	57,152	22,102	1840,596
NHL_10T2_ST	M3ST1	60,035	34,125	67,517	22,407	1797,886
	M3ST2	52,483	29,727	58,554	21,060	1820,620
	M3ST3	54,761	31,025	61,508	22,134	1796,444
NHL_25T1_ST	M4ST1	71,660	40,967	80,523	22,406	1811,609
	M4ST2	56,448	32,276	63,377	22,279	1814,990
	M4ST3	47,583	26,925	53,74	22,961	1774,492
NHL_25T2_ST	M5ST1	52,061	29,835	58,367	22,102	1824,653
	M5ST2	53,931	30,731	60,321	21,595	1822,609
	M5ST3	62,405	35,882	70,152	22,606	1820,980
NHL_M	M1M1	26,349	19,585	38,001	63,271	1430,767
	M1M2	33,516	23,955	37,162	27,607	2537,745
	M1M3	61,018	37,147	71,81	31,134	1760,321
NHL_10T1_M	M2M1	63,788	37,119	72,872	25,408	1784,130
	M2M2	59,613	34,532	68,028	25,122	1779,705
	M2M3	60,467	35,231	68,883	25,009	1796,832
NHL_10T2_M	M3M1	57,800	34,288	66,214	26,355	1810,437
	M3M2	65,746	38,929	75,372	26,414	1804,078
	M3M3	58,358	34,791	67,25	27,395	1797,899
NHL_25T1_M	M4M1	36,108	21,011	41,006	24,496	1805,851
	M4M2	52,822	31,005	60,13	25,092	1813,631
	M4M3	35,761	20,721	40,582	24,274	1800,564
NHL_25T2_M	M5M1	55,274	32,792	63,41	26,573	1805,278
	M5M2	47,562	28,18	54,604	26,650	1799,955
	M5M3	55,830	33,101	64,081	26,633	1802,130

Quadro6.9 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 90 dias

90 Dias	Provete	M1 seca [g]	M2 hidrostática [g]	M3 saturada [g]	P.A [%]	MV[kg/m3]
NHL3,5_ST	M1ST4	59,312	35,431	65,43	20,394	1977,133
	M1ST5	62,216	33,172	68,47	17,718	1762,593
	M1ST6	60,902	34,063	67,296	19,240	1832,576
NHL_10T1_ST	M2ST4	60,514	34,175	66,718	19,064	1859,509
	M2ST5	56,716	31,854	62,842	19,769	1830,257
	M2ST6	59,110	33,53	65,241	19,334	1864,022
NHL_10T2_ST	M3ST4	95,436	53,834	106,076	20,367	1826,806
	M3ST5	73,078	41,448	81,491	21,010	1824,988
	M3ST6	75,566	42,938	83,543	19,645	1861,002
NHL_25T1_ST	M4ST4	82,180	46,154	92,02	21,454	1791,741
	M4ST5	68,528	39,109	76,296	20,889	1842,795
	M4ST6	71,247	40,13	78,442	18,780	1859,652
NHL_25T2_ST	M5ST4	61,419	35,285	68,298	20,837	1860,449
	M5ST5	62,360	35,756	69,487	21,129	1848,744
	M5ST6	57,890	33,095	64,651	21,425	1834,516
NHL_M	M1M4	63,187	36,471	71,81	24,401	1788,025
	M1M5	63,136	36,284	71,27	23,249	1804,608
	M1M6	63,343	37,58	72,094	25,355	1835,284
NHL_10T1_M	M2M4	64,501	38,45	73,603	25,893	1834,865
	M2M5	72,302	42,737	82,913	26,411	1799,632
	M2M6	62,596	36,746	70,926	24,371	1831,363
NHL_10T2_M	M3M4	61,922	36,541	71,067	26,487	1793,489
	M3M5	63,910	38,055	73,226	26,488	1817,122
	M3M6	63,467	37,041	71,66	23,666	1833,300
NHL_25T1_M	M4M4	58,987	34,08	66,56	23,316	1816,102
	M4M5	53,576	31,104	60,526	23,622	1820,950
	M4M6	57,554	32,921	61,925	15,070	1984,347
NHL_25T2_M	M5M4	58,043	34,3	65,433	23,737	1864,356
	M5M5	65,967	38,574	74,602	23,967	1830,993
	M5M6	72,121	42,665	81,051	23,264	1878,836

Quadro 6.10 - Porosidade aberta e massa volúmica aos 90 dias

180 Dias	Provete	M1 seca [g]	M2 hidrostática [g]	M3 saturada [g]	P.A [%]	MV [kg/m3]
NHL_ST	M1ST4	60,575	33,351	67,857	21,104	1755,492
	M1ST5	46,279	25,95	52,73	24,089	1728,118
	M1ST6	58,875	32,109	65,981	20,979	1738,161
NHL_10T1_ST	M2ST4	61,271	34,035	68,245	20,386	1791,026
	M2ST5	63,440	37,04	71,27	22,875	1853,345
	M2ST6	63,851	34,963	71,324	20,552	1756,030
NHL_10T2_ST	M3ST4	46,945	25,795	51,592	18,014	1819,785
	M3ST5	67,940	38,19	76,257	21,848	1784,748
	M3ST6	60,989	34,046	67,895	20,402	1801,796
NHL_25T1_ST	M4ST4	49,509	28,128	55,427	21,678	1813,583
	M4ST5	55,319	31,215	61,618	20,718	1819,524
	M4ST6	62,460	34,714	68,604	18,129	1843,022
NHL_25T2_ST	M5ST4	56,049	31,89	61,545	18,533	1890,035
	M5ST5	74,358	41,922	83,665	22,296	1781,329
	M5ST6	37,384	20,89	41,58	20,280	1806,863
NHL_M	M1M4	67,222	35,964	76,068	22,058	1676,192
	M1M5	64,905	36,866	73,616	23,703	1766,122
	M1M6	76,971	40,8744	88,872	24,795	1603,643
NHL_10T1_M	M2M4	76,657	46,4	86,548	24,636	1909,360
	M2M5	67,234	39,409	77,136	26,246	1782,119
	M2M6	47,400	28,978	54,014	26,418	1893,274
NHL_10T2_M	M3M4	58,752	35,155	65,969	23,421	1906,666
	M3M5	59,023	36,377	66,538	24,916	1956,931
	M3M6	60,062	0	64,51	6,895	931,049
NHL_25T1_M	M4M4	60,323	36,594	68,084	24,646	1915,624
	M4M5	45,111	26,04	53,114	29,560	1666,211
	M4M6	57,219	33,851	63,925	22,298	1902,607
NHL_25T2_M	M5M4	67,665	36,725	76,867	22,924	1685,641
	M5M5	62,458	39,124	71,084	26,990	1954,255
	M5M6	70,121	42,665	79,616	25,696	1897,675

Quadro6.11 - Capilaridade aos 28 dias cura standard

28 dias	Quantidade de água absorvida [kg/m ²]				
[min ^{0,5}]	NHL_ST	NHL_10T1_ST	NHL_10T2_ST	NHL_25T2_ST	NHL_25T2_ST
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	8,27	8,04	7,21	8,24	6,95
3,16	10,79	10,42	9,62	10,59	9,43
3,87	12,64	12,08	11,44	12,50	11,39
5,48	16,04	15,44	15,05	16,31	15,49
7,75	16,50	16,89	15,70	17,30	16,64
10,95	16,51	16,92	15,73	17,44	16,67
13,42	16,49	16,92	15,78	17,40	16,75
15,49	16,54	16,97	15,86	17,49	16,80
17,32	16,59	17,16	15,83	17,44	16,83
37,95	16,83	17,42	16,23	17,79	17,11
53,67	16,96	17,73	16,43	18,00	17,43
65,73	17,25	17,92	16,69	18,19	17,63
92,95	17,50	18,12	16,99	18,43	18,05

Quadro 6.12 - Capilaridade aos 28 dias cura marítima

28 dias	Quantidade de água absorvida [kg/m ²]				
[min ^{0,5}]	NHL_M	NHL_10T1_M	NHL_10T2_M	NHL_25T1_M	NHL_25T2_M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	9,14	9,02	8,61	8,64	10,93
3,16	12,33	12,47	11,90	11,53	14,21
3,87	14,68	14,74	14,22	13,78	16,47
5,48	19,13	19,22	18,56	18,40	21,25
7,75	20,20	20,22	19,82	21,01	21,65
10,95	20,31	20,36	19,94	21,11	21,82
13,42	20,49	20,43	19,98	21,15	21,93
15,49	20,39	20,44	20,00	21,17	21,95
17,32	20,42	20,42	20,07	21,22	21,95
37,95	20,72	20,73	20,31	21,44	22,39
53,67	20,89	20,89	20,29	21,63	22,50
65,73	21,08	21,07	20,65	21,85	22,70
92,95	21,18	21,34	21,09	22,14	22,90

Quadro 6.13 - Capilaridade aos 90 dias cura standard

90 dias	Quantidade de água absorvida [kg/m ²]				
[min ^{0,5}]	NHL_ST	NHL_10T1_ST	NHL_10T2_ST	NHL_25T1_ST	NHL_25T2_ST
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	7,62	7,32	7,15	7,32	7,23
3,16	10,10	9,62	9,42	9,89	9,73
3,87	11,85	11,27	11,15	11,76	11,60
5,48	15,14	14,71	14,58	15,37	15,42
7,75	15,68	15,61	15,45	15,80	16,57
10,95	15,71	15,69	15,49	16,03	16,64
13,42	15,76	15,76	15,53	16,06	16,74
15,49	15,85	15,82	15,66	16,15	16,73
37,95	15,99	16,07	15,89	16,29	16,99
53,67	16,39	16,71	16,50	16,87	17,46
65,73	16,57	16,81	16,60	16,95	17,58

Quadro 6.14 - Capilaridade aos 90 dias cura marítima

90 Dias	Quantidade de água absorvida [kg/m ²]				
[min ^{0,5}]	NHL_M	NHL_10T1_M	NHL_10T2_M	NHL_25T1_M	NHL_25T2_M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	7,36	7,62	8,58	9,11	9,66
3,16	10,72	10,76	11,55	11,78	12,36
3,87	13,19	13,18	13,93	13,87	14,59
5,48	16,39	16,32	17,03	16,69	17,15
7,75	19,11	19,34	19,79	19,93	17,95
10,95	19,24	19,46	19,89	20,68	18,07
13,42	19,22	19,47	19,91	20,89	18,18
15,49	19,40	19,58	20,03	21,03	18,28
37,95	19,71	19,80	20,40	21,26	18,53
53,67	20,35	20,42	21,08	21,78	19,07
65,73	20,41	20,50	21,19	21,94	19,17

Quadro 6.15 - Capilaridade aos 180 dias cura standard

180 Dias	Quantidade de água absorvida [kg/m ²]				
[min ^{0,5}]	NHL_ST	NHL_10T1_ST	NHL_10T2_ST	NHL_25T1_ST	NHL_25T2_ST
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	7,19	7,33	7,47	8,41	7,40
3,16	11,58	10,99	10,65	12,36	10,79
3,87	13,85	13,28	12,42	15,76	14,01
5,48	15,68	14,87	13,80	16,60	15,30
7,75	16,04	15,01	13,93	16,67	15,86
10,95	16,31	15,05	14,02	16,72	15,78
13,42	16,38	15,15	14,10	16,86	15,82
15,49	16,80	15,44	14,34	17,22	16,17
37,95	16,97	15,95	14,70	17,41	16,23
53,67	17,31	16,27	15,01	17,68	16,76
65,73	17,59	16,69	15,33	18,01	17,13
75,89	17,63	16,77	15,42	18,09	17,20

Quadro 6.16 - Capilaridade 180 dias cura marítima

180 dias	Quantidade de água absorvida [kg/m ²]				
[min ^{0,5}]	NHL_M	NHL_10T1_M	NHL_10T2_M	NHL_25T1_M	NHL_25T2_M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	12,01	10,21	13,76	11,46	13,24
3,16	15,29	13,53	17,29	14,48	16,19
3,87	18,19	18,26	18,37	17,30	18,14
5,48	18,80	18,54	18,37	18,08	18,42
7,75	19,08	18,51	18,38	18,10	18,50
10,95	19,43	18,45	18,39	18,14	18,57
13,42	19,53	18,55	18,50	18,18	18,68
15,49	19,97	18,82	18,67	18,51	19,22
37,95	20,26	19,35	19,35	19,11	19,67
53,67	20,68	19,85	19,85	19,57	20,14
65,73	21,03	20,15	20,07	19,92	20,25
75,89	21,21	20,27	20,20	20,05	20,39

Quadro 6.17 - Variação de massa por sulfatos aos 28 dias cura standard

Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL_ST	0,41	0,60	0,53	0,43	0,20	0,15	-0,92	-1,77	-3,03	-4,60	-6,83	-6,86	-9,20	-10,93	-13,87	-15,09	-16,08	-21,01	-23,83	-28,00
NHL_10T1_ST	5,52	5,66	5,81	5,70	5,76	5,73	5,15	4,64	3,36	2,20	0,17	0,12	-1,12	-2,41	-5,76	-6,53	-9,59	-11,87	-15,31	-19,15
NHL_10T2_ST	-0,58	-0,40	-0,26	-0,22	-0,22	-0,23	-0,88	-1,46	-0,86	-3,19	-4,88	-4,97	-6,25	-6,87	-9,05	-9,14	-10,90	-15,19	-17,71	-21,01
NHL_25T1_ST	4,01	4,19	4,27	4,22	4,07	4,17	3,35	2,47	1,32	-0,63	-2,91	-3,00	-3,36	-3,50	-6,66	-6,91	-8,08	-14,19	-14,39	-19,80
NHL_25T2_ST	2,25	2,60	2,58	2,57	2,44	2,53	1,79	1,07	-0,18	-2,46	-4,72	-4,84	-6,16	-6,41	-8,73	-8,90	-8,99	-14,95	-20,15	-37,82

Quadro 6.18 - Variação de massa por sulfatos aos 28 dias cura marítima

Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL_M	0,42	0,63	0,70	0,44	-0,03	0,02	-0,74	-3,53	-8,92	-13,48	-19,07	-23,26	-27,75	-28,80	-31,28	-33,18	-37,91	-44,77	-53,45	-59,73
NHL_10T1_M	1,83	2,08	2,31	2,09	1,30	0,66	-0,80	-3,49	-8,46	-12,75	-17,24	-45,97	-47,34	-48,20	-51,10	-53,16	-54,43	-59,74	-62,61	-67,12
NHL_10T2_M	-2,50	-2,22	-1,98	-1,68	-2,10	-2,12	-2,17	-3,32	-7,21	-13,51	-18,61	-18,78	-25,05	-28,22	-36,91	-38,16	-44,17	-68,69	-77,26	-80,48
NHL_25T1_M	5,45	5,75	5,93	5,93	5,22	4,85	4,82	4,25	-2,42	-12,97	-19,05	-20,55	-25,31	-27,47	-31,63	-35,29	-38,97	-46,11	-53,78	-66,04
NHL_25T2_M	6,58	6,80	6,61	6,56	5,65	4,23	2,09	-21,94	-50,73	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00

Quadro 6.19 - Variação de massa por sulfatos aos 90 dias cura standard

Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL_ST	0,37	1,06	1,71	2,18	2,45	2,35	2,05	2,04	-21,28	-36,96	-37,68	-67,25	-67,39	-70,84	-71,18	-71,21	-71,31	-71,39	-71,47	-71,71
NHL_10T1_ST	2,18	2,88	3,55	3,94	4,09	3,79	3,53	3,75	3,72	3,53	3,48	4,58	2,53	1,09	0,09	-1,15	-3,62	-6,30	-11,12	-13,55
NHL_10T2_ST	-1,93	-1,24	-0,58	-0,17	0,04	-0,30	-1,02	-1,28	-1,56	-1,80	-1,86	-2,42	-2,84	-4,54	-5,44	-18,70	-21,59	-24,07	-27,08	-29,89
NHL_25T1_ST	0,34	1,11	1,91	2,39	2,37	1,96	0,89	0,37	-0,76	-1,50	-2,25	-3,61	-4,23	-6,04	-8,23	-9,61	-28,45	-34,54	-36,40	-39,88
NHL_25T2_ST	2,34	3,15	3,90	4,41	4,52	4,16	3,02	2,65	2,41	2,16	1,46	-0,14	-0,74	-3,19	-5,17	-10,60	-13,93	-20,93	-23,75	-33,55

Quadro 6.20 - Variação de massa por sulfatos aos 90 dias cura marítima

Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL_M	0,47	1,32	2,09	2,13	-1,36	-5,53	-11,66	-14,98	-19,58	-24,42	-27,80	-31,49	-33,96	-38,09	-40,46	-42,21	-62,12	-63,21	-64,40	-64,90
NHL_10T1_M	5,91	6,96	8,16	7,49	4,36	-0,94	-6,13	-8,86	-12,72	-17,27	-20,78	-24,77	-27,04	-31,04	-33,88	-37,01	-40,46	-42,60	-45,49	-62,69
NHL_10T2_M	3,35	4,36	5,08	5,05	1,64	-3,60	-9,63	-13,82	-19,70	-25,06	-29,62	-34,18	-37,11	-41,84	-45,64	-49,65	-53,79	-67,83	-68,98	-74,95
NHL_25T1_M	1,95	2,87	3,53	3,52	0,71	-3,86	-10,18	-13,37	-19,42	-24,19	-30,29	-34,79	-36,80	-42,48	-48,08	-52,93	-54,79	-56,44	-72,99	-86,79
NHL_25T2_M	-1,83	-0,86	-0,39	-1,15	-3,31	-6,93	-11,22	-13,01	-17,65	-23,56	-28,59	-31,69	-36,24	-41,22	-46,70	-56,52	-57,98	-86,46	-100,00	-100,00

Quadro 6.21 - Variação de massa por sulfatos aos 180 dias cura standard

Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL_ST	0,14	0,21	-0,03	0,59	-0,52	-0,84	-1,85	-2,85	-4,70	-6,88	-8,17	-11,84	-14,30	-15,81	-17,87	-22,65	-23,53	-24,84	-25,04	-34,51
NHL_10T1_ST	0,24	0,23	0,55	0,70	0,07	-0,30	-0,68	-0,80	-0,78	-3,06	-5,33	-5,67	-5,99	-7,57	-8,28	-12,55	-12,95	-14,50	-14,67	-15,56
NHL_10T2_ST	-10,82	-10,83	-10,56	-10,44	-11,37	-12,01	-12,45	-12,42	-14,71	-18,29	-19,12	-19,33	-21,96	-23,75	-24,81	-30,15	-30,51	-31,02	-31,43	-31,74
NHL_25T1_ST	3,60	3,59	4,00	4,20	3,27	2,71	2,28	2,43	2,42	-0,41	-0,20	-2,05	-4,11	-7,45	-8,88	-17,21	-17,66	-19,08	-20,05	-20,67
NHL_25T2_ST	0,73	0,72	1,11	1,01	-0,08	-0,58	-1,25	-1,18	-1,76	-5,02	-6,24	-7,64	-11,15	-16,19	-18,98	-27,86	-29,76	-30,79	-32,28	-36,16

Quadro 6.22 - Variação de massa por sulfatos aos 180 dias cura marítima

Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL_M	0,09	0,06	0,51	0,72	-1,35	-2,37	-4,33	-5,71	-7,02	-47,53	-56,66	-77,95	-79,50	-80,84	-81,25	-83,87	-84,70	-100,00	-100,00	-100,00
NHL_10T1_M	0,55	0,65	1,02	1,16	0,84	-1,46	-2,76	-3,68	-4,67	-7,89	-14,66	-19,20	-22,35	-87,53	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
NHL_10T2_M	-0,53	-0,42	-0,10	0,01	-2,31	-2,87	-6,75	-8,50	-10,91	-20,51	-53,67	-58,23	-61,15	-63,15	-65,07	-71,03	-83,62	-83,87	-86,64	-100,00
NHL_25T1_M	-1,51	-1,50	-1,12	-0,95	-3,29	-5,02	-6,72	-8,36	-11,76	-27,29	-45,12	-52,11	-83,95	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
NHL_25T2_M	-0,65	-0,67	-0,38	-0,45	-3,97	-7,06	-12,05	-22,81	-25,95	-56,18	-81,54	-87,30	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00

